

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA



DEPARTAMENT
D'ENGINYERIA MECÀNICA

Estudio para la mejora del acabado superficial de superficies complejas, aplicando un proceso de deformación plástica (Bruñido con Bola)

Autor: José Antonio Travieso Rodríguez

Director de tesis: Dr. Hernán Alberto González Rojas

Programa de doctorado: Ingeniería Mecánica, Fluidos y Aeronáutica

**Tesis presentada para obtener el título de Doctor
por la Universitat Politècnica de Catalunya**

Barcelona, julio de 2010

“La persona que no comete nunca una tontería no hará nada interesante en la vida...” Proverbio inglés

Después de caminar durante algunos años por largos y difíciles caminos he llegado por fin, sin saber como, al final de esta etapa. Esta etapa ha sido dura, la verdad.

La tesis ha sido el centro de mi vida en estos últimos años, pero ello no quiere decir que ha sido lo único que he tenido que superar para llegar hasta el fin. Ha requerido de mucho esfuerzo personal, pero también por parte de mucha gente que he tenido en mi entorno, que han estado en todo momento apoyándome y dándome ánimos cuando la fatiga y los golpes que me ha dado la vida, me intentaban pasar factura.

Hernán González, director de esta tesis, a ti especialmente te quiero agradecer la paciencia y la ayuda de tanto valor que me has dado para poder llegar al final. Mis compañeros, que de alguna manera u otra han colaborado con su trabajo: Gilles Dessein, Joan Vivancos, Ramón Casado, Alex Fernández, Amelia Nápoles, Jordi Llumà, Jordi Jorba, Miguel Angel Gómez, Rudolf Schulz, Daniel Romanillos, Sergio Calles, Eva Martínez, entre otros.

Mi familia, la que está lejos y la que está cerca, a quien agradezco el ánimo que me han dado en todo momento. A mi entorno más cercano: mis amigos y mis compañeros de la EUETIB. Sin vuestro apoyo nunca hubiera llegado hasta este final interesante, o mejor aún hasta el principio de esta nueva etapa.

Muchas gracias.....

Toni Travieso, Julio de 2010

Índice

RESUMEN.....	I
SUMMARY.....	III
RÉSUMÉ.....	IV
Nomenclatura.....	VII
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1. Problemática del acabado superficial en superficies complejas.....	3
1.2. Cuestionamientos previos.....	5
1.3. Hipótesis planteadas.....	5
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos.....	6
1.5. Metodología.....	6
1.6. Estructura de la tesis.....	7
1.7. Publicaciones realizadas.....	7
1.8. Alcance y contribución de la tesis.....	9
Capítulo 2. Estado del arte.....	10
2.1. Mejora del acabado superficial de superficies complejas.....	10
2.2. Deformación plástica.....	13
2.3. Mejora del acabado superficial a través del bruñido con bola.....	15
2.3.1. Principales aspectos comunes descritos en los trabajos analizados.....	28
2.3.2. Principales diferencias encontradas entre los trabajos analizados.....	29
2.3.3. Conclusiones sobre los aspectos comunes y las diferencias encontradas entre los trabajos analizados.....	30
Capítulo 3. Descripción del proceso en estudio y de las características de la herramienta desarrollada.....	31
3.1. Proceso de Bruñido.....	31
3.2. Ventajas e inconvenientes de este tipo de procesos.....	33
3.3. Prototipos de herramienta de bruñido similares.....	35
3.4. Descripción de los elementos mecánicos que componen la herramienta.....	39
3.4.1. Cuerpo principal de la herramienta.....	39
3.4.2. Bola bruñidora.....	40
3.4.3. Casquillo de fricción.....	41
3.4.4. Vástago empujador o guiador.....	42
3.4.5. Taqué hidráulico.....	42
3.4.6. Juntas tóricas.....	43
3.4.7. Tapón del conjunto.....	44
3.5. Elementos que componen el sistema hidráulico de la herramienta.....	44
3.5.1. Elementos de control de la presión.....	45
3.5.2. Funcionamiento del sistema hidráulico.....	46
Capítulo 4. Modelo físico para estudiar la mejora de la rugosidad superficial de una pieza al ser bruñida.....	47
4.1. Aspectos generales sobre los modelos.....	48
4.1.1. Definición de los aspectos geométricos.....	48
4.1.2. Fuerzas y esfuerzos que actúan sobre un elemento diferencial de área.....	49
4.2. Primera aproximación a la solución de la ecuación representativa del modelo físico para la deformación de la superficie continua de un cuerpo.....	50
4.3. Segunda aproximación a la solución de la ecuación representativa del modelo físico para la deformación de un cuerpo que se auto-endurece.....	53
4.4. Validación de los modelos matemáticos.....	58
Capítulo 5. Experimentos para la valoración de la influencia de las variables del proceso sobre los resultados del mismo.....	62
5.1. Primer experimento. Estudio de la influencia del ancho de la pasada lateral y la velocidad de avance sobre los resultados del proceso de bruñido.....	63

5.1.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial.....	66
5.1.2. Comentarios sobre los resultados del experimento.....	74
5.2. Segundo experimento. Estudio de la influencia del aumento de la velocidad de avance y de la variación de la presión hidráulica, sobre los resultados del proceso de bruñido.....	75
5.2.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial.....	77
5.2.2. Comentarios sobre los resultados del experimento.....	86
5.3. Tercer experimento. Estudio del proceso de bruñido en piezas planas de aluminio A92017	88
5.3.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial.....	90
5.3.2. Comentarios sobre los resultados del experimento.....	100
5.4. Cuarto experimento. Estudio del proceso de bruñido en piezas planas de Acero G10380	104
5.4.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial.....	105
5.4.2. Comentarios sobre los resultados del experimento.....	116
5.5. Quinto experimento. Estudio de las características del proceso de bruñido en piezas convexas de aluminio A92017	119
5.5.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial....	121
5.5.2. Comentarios sobre los resultados del experimento.....	130
5.6. Sexto experimento. Estudio de las características del proceso de bruñido en piezas convexas de acero G10380	131
5.6.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial....	132
5.6.2. Comentarios sobre los resultados del experimento.....	143
5.7. Séptimo experimento. Estudio de las características del proceso de bruñido en piezas cóncavas de Aluminio A92017	145
5.7.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial....	146
5.7.2. Comentarios sobre los resultados del experimento.....	156
5.8. Octavo experimento. Estudio de las características del proceso de bruñido en piezas cóncavas de Acero G10380	158
5.8.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial....	159
5.8.2. Comentarios sobre los resultados del experimento.....	168
5.9. Resumen de las mediciones de rugosidad superficial.....	170
Capítulo 6. Experimentos para la comprobación de los valores añadidos del proceso de bruñido con bola	172
6.1. Medición de la dureza superficial	172
6.1.1. Primer experimento. Medición de dureza superficial en probetas de aluminio A96351	172
6.1.2. Segundo experimento. Medición de micro-dureza en probetas convexas de aluminio A92017	178
6.1.3. Tercer experimento. Medición de micro-dureza en probetas convexas de acero G10380	182
6.2. Comentarios sobre los resultados de las mediciones de la dureza superficial ...	186
6.3. Mediciones de las tensiones residuales en probetas convexas de aluminio A96351	187
6.3.1. Comentarios sobre los resultados del experimento.....	191
6.4. Análisis microscópico de la pieza bruñida	192
6.4.1. Comentarios sobre los resultados de la prueba de microscopia	192
6.5. Conclusiones acerca de los valores añadidos que aporta el bruñido con bola ...	193
Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros	194
7.1. Conclusiones	194
7.2. Trabajos futuros.....	196
Chapitre 7. Conclusions et travail future	197
7.1. Conclusions	197
7.2. Travaux futurs.....	199
Referencias bibliográficas.....	200

Artículos en revistas indexadas.....	200
Libros.....	202
Comunicaciones a congresos, revistas científico – técnicas y otras publicaciones.....	203
Anexo 1. Fichas técnicas de los materiales utilizados en las probetas ensayadas....	207
Anexo 1.1. Ficha técnica de material: UNS A96351.....	207
Anexo 1.2. Ficha técnica de material UNS A92017.....	208
Anexo 1.3. Ficha técnica de material UNS G10380	209
Anexo 2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la fabricación de las probetas de los experimentos.....	210
Anexo 2.1. Ensayo de tracción uniaxial.....	210
Anexo 2.2. Propiedades mecánicas	211
Anexo 2.3. Determinación del módulo de Young por ultrasonidos.....	214
Anexo 3. Cálculos desarrollados para el análisis del diseño de la herramienta.....	220
Anexo 3.1. Componentes fundamentales de la herramienta.....	220
Anexo 3.2. Cálculos de fuerzas y presiones hidráulicas.	220
Anexo 3.3. Análisis de los esfuerzos en el cuerpo de la herramienta	222
Anexo 4. Descripción de los indicadores de rugosidad superficial utilizados en el estudio	225
Anexo 4.1. Condiciones de cálculo.....	225
Anexo 4.1.1. Parámetros de la norma ISO 4287:1997	225
Anexo 4.2. Referencias normativas.....	227
Anexo 5. Gráficos obtenidos para los parámetros medidos durante el proceso de bruñido.....	228
Anexo 5.1. Experimento 1- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas planas de Aluminio A96351.....	228
Anexo 5.2. Experimento 2- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas planas de Aluminio A96351.....	230
Anexo 5.3. Experimento 3- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas planas de Aluminio A92017.....	232
Anexo 5.4. Experimento 4- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas planas de Acero G10380.....	234
Anexo 5.5. Experimento 5- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas convexas de Aluminio A92017	236
Anexo 5.6. Experimento 6- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas convexas de Acero G10380.....	240
Anexo 5.7. Experimento 7- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas cóncavas de Aluminio A92017	244
Anexo 5.8. Experimento 8- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas cóncavas de Acero G10380	248
Anexo 5.9. Gráficos de rugosidad superficial con las mediciones del salto entre las crestas de la superficie fresada y bruñida utilizados para la validación del modelo físico	252
Anexo 6. Gráficos obtenidos en la monitorización de las fuerzas de bruñido	255
Anexo 7- Análisis estadístico de los valores de dureza HV.....	258

Índice de figuras

Figura 1.1. Esquema del proceso de Bruñido con Bola	1
Figura 1.2. Perfil 3D de rugosidad superficial de una pieza mecanizada.....	2
Figura 1.3. Acabado manual de superficies complejas de un molde	4
Figura 1.4. Acabado de una superficie cóncava utilizando el Bruñido con bola utilizando la herramienta desarrollada.....	4
Figura 2.1. Procesos más comúnmente utilizados para mejorar el acabado superficial de piezas mecanizadas.	10
Figura 2.2. Imagen del dispositivo desarrollado por IDEKO.....	11
Figura 2.3. Imagen del proceso de pulido láser. (www.interempresas.net).....	12
Figura 2.4. Instalación para medir fuerzas en el proceso de deformación plástica de una pieza cilíndrica sometida a presión, desarrollado por (X.L. Hu et al., 2004)	13
Figura 2.5. Gráfico que muestra la relación P media, D/h de un cuerpo cilíndrico sometido a deformación plástica (X.L. Hu et al., 2004).....	14
Figura 2.6. Instalación utilizada para las pruebas por M. BAKHSHI-JOOYBARI, et al., 1996.....	15
Figura 2.7. Influencia de la velocidad de rotación y la fuerza de contacto sobre la resistencia al desgaste de la pieza bruñida. (Adel Mahmood Hassan & Sulieman Z.S. Al-Dhi, 1999).....	16
Figura 2.8. Efecto de la rugosidad superficial inicial sobre la rugosidad superficial final en piezas bruñidas de Bronce, con diferentes fuerzas aplicadas. Condiciones de bruñido: V=26 m/min, f=0.08 mm/rev, N=1, HV.127. (Adel Mahmood Hassan & Ayman Mohammad Maqableh, 2000).....	18
Figura 2.9. Diagrama esquemático para el proceso de bruñido con bola (Fang-Jung Shiou & Chien-Hua Chen, 2003)	20
Figura 2.10. Representación de las fuerzas que actúan durante el proceso de bruñido. (Fang-Jung Shiou & Chien-Hua Chen, 2003).....	21
Figura 2.11. Esquema de la orientación del bruñido con respecto a la dirección de deslizamiento, bruñido en la dirección del fresado; bruñido cruzado a la dirección del fresado. (N.S.M. El-Tayeb et al, 2007)	25
Figura 2.12. Esquema del proceso de bruñido descrito con el modelo desarrollado por (Ainoha Celaya et al, 2009)	27
Figura 2.13. Imagen del modelo 2D del proceso de bruñido desarrollado por (Ainoha Celaya et al, 2009).....	28
Figura 3.1. Esquema representativo del proceso de deformación plástica de las crestas de las irregularidades de una superficie mecanizada.....	32
Figura 3.2. Herramientas para bruñir con rodillo utilizada en operaciones de torno. (1)- N.S.M. El-Tayeb et al., 2007. (2)- Comercializada por Mech-India ENGINEERS PVT. LTD., http://www.mechindia.com/).....	35
Figura 3.3. Herramienta para bruñir con bola utilizada en torno. (1)- A.M. Hassan et al, 1998. (2)- Comercializada por Ecoroll AG Werkzeugtechnik, www.ecoroll.de . (3)- F.-J. Shiou et al., 2003.....	36
Figura 3.4. Herramienta para bruñir con bola utilizada para piezas planas (N. López de la Calle et al., 2005).....	37
Figura 3.5. Esquema de la herramienta diseñada.....	38
Figura 3.6. (1) Cuerpo principal de la herramienta, (2) Bola de diámetro 10mm, (3) Casquillo de fricción, (4) Vástago o guiador, (5) Taqué hidráulico, (6) Tapa superior del cuerpo, (7) Cono BT-40 utilizado para el acoplamiento a la máquina, (8) Junta tórica.....	39
Figura 3.7. Sección del cuerpo de la herramienta	40
Figura 3.8. Sección del taqué hidráulico.....	43
Figura 3.9. Sección del posicionamiento del taqué y las juntas	44
Figura 3.10. Elementos que conforman el tapón.....	44
Figura 3.11. Esquema hidráulico de control de la herramienta	45
Figura 3.12. Válvula limitadora de presión mediante regulación externa (3vías)	45
Figura 3.13. Manómetro convencional utilizado 0-4 bar.....	46

Figura 3.14. Imagen del prototipo fabricado	46
Figura 4.1. Representación esquemática y gráfico real, de la huella dejada por la bola de la herramienta a su entrada en la pieza de trabajo	48
Figura 4.2. Representación esquemática del elemento diferencial de área tomado para el estudio	49
Figura 4.3. Gráfico representativo de la variación de los valores de presión adimensional en función de la longitud de contacto adimensional de la bola, para diferentes valores de e/L_m en el Aluminio A92017	56
Figura 4.4. Gráfico representativo de la variación de los valores de presión adimensional en función de la longitud de contacto adimensional de la bola, para diferentes valores de e/L_m en el Acero G10380	57
Figura 4.5. Gráficos representativos del número B, en función de la relación e/L_m	58
Figura 4.6. Probetas de (A) aluminio A92017 y (B) acero G10380, utilizadas para los ensayos de validación del modelo físico	59
Figura 4.7. Gráfico de rugosidad superficial de un perfil en la zona de la pieza donde se puede observar el salto de la zona fresada a la zona bruñida de la misma	59
Figura 4.8. Centro de Mecanizado HURON	60
Figura 4.9. Gráficos representativos del número B, en función de la relación e/L_m para los datos del modelo y los experimentos	60
Figura 5.1. Centro de Mecanizado LAGUN	64
Figura 5.2. Probetas utilizadas para los ensayos de rugosidad superficial. A- Antes de bruñir, B-Después de bruñir. C- Fotografía de la superficie de la pieza	65
Figura 5.3. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	68
Figura 5.4. Efectos sobre R_a de las variables del proceso	69
Figura 5.5. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	70
Figura 5.6. Efectos sobre R_t de las variables del proceso	71
Figura 5.7. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	72
Figura 5.8. Efectos sobre R_a de las variables del proceso	72
Figura 5.9. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	73
Figura 5.10. Efectos sobre R_t de las variables del proceso	74
Figura 5.11. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir	76
Figura 5.12. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	78
Figura 5.13. Efectos sobre R_a de las variables del proceso	79
Figura 5.14. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	80
Figura 5.15. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	81
Figura 5.16. Efectos sobre R_t de las variables del proceso	81
Figura 5.17. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	82
Figura 5.18. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para R_a per	83
Figura 5.19. Efectos sobre R_a de la velocidad de avance	84
Figura 5.20. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	85
Figura 5.21. Efectos sobre R_t de las variables del proceso	85
Figura 5.22. Gráfico resumen de los experimentos sobre probetas planas de Aluminio A96351	87
Figura 5.23. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir	89
Figura 5.24. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	92
Figura 5.25. Efectos sobre R_a de las variables del proceso	93
Figura 5.26. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	94
Figura 5.27. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	95
Figura 5.28. Efectos sobre R_t de las variables del proceso	95
Figura 5.29. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	96
Figura 5.30. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	97
Figura 5.31. Efectos sobre R_a de las variables del proceso	98
Figura 5.32. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	99

Figura 5.33. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	100
Figura 5.34. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	100
Figura 5.35. Gráfico resumen de los experimentos 1, 2 y 3	103
Figura 5.36. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial. A –Antes de bruñir, B- Después de bruñir.....	104
Figura 5.37. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	106
Figura 5.38. Gráfica regresión lineal e Intervalo de confianza para Ra par.	107
Figura 5.39. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	108
Figura 5.40. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	109
Figura 5.41. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para Rt par.....	110
Figura 5.42. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	111
Figura 5.43. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	112
Figura 5.44. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para Ra per.....	112
Figura 5.45. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	113
Figura 5.46. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	114
Figura 5.47. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para Rt per.....	115
Figura 5.48. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	116
Figura 5.49. Gráfico resumen de los experimentos sobre probetas planas de aluminio A92017 y acero G10380.....	118
Figura 5.50. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir.....	120
Figura 5.51. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	122
Figura 5.52. Gráfica regresión lineal e Intervalo de confianza para Ra par.	123
Figura 5.53. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	124
Figura 5.54. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	125
Figura 5.55. Gráfica regresión lineal e Intervalo de confianza para Rt par.	125
Figura 5.56. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	126
Figura 5.57. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	127
Figura 5.58. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	128
Figura 5.59. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	129
Figura 5.60. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	129
Figura 5.61. Gráfico resumen del quinto experimento.....	131
Figura 5.62. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir.....	132
Figura 5.63. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	133
Figura 5.64. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	134
Figura 5.65. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	135
Figura 5.66. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	136
Figura 5.67. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	137
Figura 5.68. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	137
Figura 5.69. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	138
Figura 5.70. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	139
Figura 5.71. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	140
Figura 5.72. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	141
Figura 5.73. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	142
Figura 5.74. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	142
Figura 5.75. Gráfico resumen de los experimentos 5 y 6	144
Figura 5.76. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir.....	145
Figura 5.77. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	147
Figura 5.78. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	148
Figura 5.79. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	149
Figura 5.80. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	150
Figura 5.81. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	151
Figura 5.82. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	151

Figura 5.83. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	152
Figura 5.84. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	153
Figura 5.85. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	154
Figura 5.86. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	155
Figura 5.87. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	155
Figura 5.88. Gráfico comparativo entre los resultados de rugosidad para probetas convexas y cóncavas de Aluminio A92017	157
Figura 5.89. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir.....	158
Figura 5.90. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	160
Figura 5.91. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	161
Figura 5.92. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	161
Figura 5.93. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	162
Figura 5.94. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	163
Figura 5.95. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	164
Figura 5.96. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	165
Figura 5.97.. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	166
Figura 5.98. Efectos sobre Ra de las variables del proceso	166
Figura 5.99. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	167
Figura 5.100. Efectos sobre Rt de las variables del proceso	168
Figura 5.101. Resumen de los resultados de las mediciones de rugosidad para las probetas cóncavas de acero G10380.....	169
Figura 6. 1. Probetas de aluminio A 96351 utilizadas en el experimento de medición de dureza.....	173
Figura 6.2. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados	175
Figura 6.3. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para HRH.....	176
Figura 6.4. Efectos sobre Ra de las variables significativas del proceso	177
Figura 6.5. Probetas de aluminio A96351 utilizadas en el experimento de medición de micro dureza	178
Figura 6.6. Diagrama de Pareto para los efectos de los parámetros sobre HV	180
Figura 6.7. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para HV	181
Figura 6.8. Efectos sobre la micro dureza de la variación del radio de curvatura de la superficie de la pieza	181
Figura 6.9. Probetas de acero G10380 utilizadas en el experimento de medición de micro dureza.....	182
Figura 6.10. Diagrama de Pareto para los efectos de los parámetros sobre HV	184
Figura 6.11. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para HV	185
Figura 6.12. Efectos sobre la micro dureza de la variación del radio de curvatura de la superficie de la pieza	185
Figura 6.13. Variación del ángulo para diferentes intensidades de radiación para la probeta 1. (aluminio A96351, superficie de radio 100 mm de curvatura).....	189
Figura 6.14. Variación del ángulo para diferentes intensidades de radiación para la probeta 1. (aluminio A96351, superficie de radio 50 mm de curvatura).....	189
Figura 6.15. Variación de las distancias entre planos d, en función del seno del ángulo Θ y valor obtenido de tensiones residuales, para la probeta 1. (aluminio A96351, superficie de radio 100 mm de curvatura)	190
Figura 6.16. Variación de las distancias entre planos d, en función del seno del ángulo Θ y valor obtenido de tensiones residuales, para la probeta 2. (aluminio A96351, superficie de radio 50 mm de curvatura)	191
Figura 6.17. Fotografía de la zona: A- bruñida, B- sin bruñir de una probeta plana de aluminio A96351	192

Índice de Tablas

Tabla 3. 1. Composición química del acero para el cuerpo.....	40
Tabla 3. 2. Características de los diferentes tratamientos de PVD utilizados	42
Tabla 4.1. Constantes del modelo y propiedades de los materiales determinadas a través de experimentos	57
Tabla 4.2. Cambio experimentados por el número de bruñido B con la variación de la velocidad de avance en el proceso de bruñido Va	58
Tabla 4.3. Condiciones con las que se realizaron los experimentos	59
Tabla 5.1.Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados	66
Tabla 5.2. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	67
Tabla 5.3. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	69
Tabla 5.4. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	71
Tabla 5.5. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	73
Tabla 5.6. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados	77
Tabla 5.7. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	78
Tabla 5.8. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	79
Tabla 5.9. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	80
Tabla 5.10. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	82
Tabla 5.11. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Ra per. .	83
Tabla 5.12. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	84
Tabla 5.13. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados	90
Tabla 5.14. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	91
Tabla 5.15. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	93
Tabla 5.16. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	94
Tabla 5.17. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	96
Tabla 5.18. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	97
Tabla 5.19. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.	98
Tabla 5.20. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.	99
Tabla 5.21. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados	105
Tabla 5.22. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	106
Tabla 5.23. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Ra par.	108
Tabla 5.24. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	109
Tabla 5.25. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Ra par.	110
Tabla 5.26. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	111
Tabla 5.27. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Ra per.	113
Tabla 5.28. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	114
Tabla 5.29. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Rt per.	115
Tabla 5.30. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados	121
Tabla 5.31. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	122
Tabla 5.32. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Ra par.	123
Tabla 5.33. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	124
Tabla 5.34. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Rt par.	126
Tabla 5.35. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	127
Tabla 5.36. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.	128
Tabla 5.37. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados	132
Tabla 5.38. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	133
Tabla 5.39. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	134
Tabla 5.40. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	135

Tabla 5.41. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	136
Tabla 5.42. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	138
Tabla 5.43. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	139
Tabla 5.44. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.	140
Tabla 5.45. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.	141
Tabla 5.46. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados	146
Tabla 5.47. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	147
Tabla 5.48. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	148
Tabla 5.49. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	149
Tabla 5.50. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	150
Tabla 5.51. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	152
Tabla 5.52. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	153
Tabla 5.53. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.	154
Tabla 5.54. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados	159
Tabla 5.55. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	159
Tabla 5.56. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	160
Tabla 5.57. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	162
Tabla 5.58. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.	163
Tabla 5.59. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	164
Tabla 5.60. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.	165
Tabla 5.61. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.	167
Tabla 5.62. Recomendaciones acerca de parámetros del proceso de bruñido a utilizar en las piezas planas	170
Tabla 5.63. Recomendaciones acerca de parámetros del proceso de bruñido a utilizar en las piezas convexas.....	171
Tabla 5.64. Recomendaciones acerca de parámetros del proceso de bruñido a utilizar en las piezas cóncavas.....	171
Tabla 6.1. Características del ensayo de dureza superficial realizado.....	173
Tabla 6.2. Resultados de las pruebas de Dureza.....	174
Tabla 6.3. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.	175
Tabla 6.4. Coeficientes de la curva de regresión para el modelo reducido de HRH ..	177
Tabla 6.5. Características del ensayo de dureza superficial realizado.....	178
Tabla 6.6. Resultados de las pruebas de micro dureza	179
Tabla 6.7. Coeficientes de la curva de regresión para HV	179
Tabla 6.8. Coeficientes de la curva de regresión para el modelo reducido de HV.....	180
Tabla 6.9. Características del ensayo de micro dureza superficial realizado.....	182
Tabla 6.10. Resultados de las pruebas de micro dureza	183
Tabla 6.11. Coeficientes de la curva de regresión para HV	183
Tabla 6.12. Coeficientes de la curva de regresión para el modelo reducido de HV...	184
Tabla 6.13. Resumen de los parámetros recomendados para el proceso de bruñido	187

RESUMEN

Mejorar el acabado superficial de una pieza plana o cilíndrica, se puede hacer de manera relativamente sencilla, utilizando para ello un proceso de rectificado. Sin embargo lograr un buen acabado superficial en una superficie de configuración geométrica compleja, es un problema difícil de tratar y es uno de los retos que tiene la industria de la manufactura de piezas a día de hoy.

Muchos elementos mecánicos como los moldes y matrices se caracterizan por tener en su geometría varias superficies complejas. De manera general casi cada producto comercial contiene, al menos, un componente crítico hecho en un molde o una matriz. Es por esto que este problema está siendo ampliamente estudiado por los investigadores de la rama de la fabricación de piezas.

En esta tesis se estudia como mejorar el acabado superficial de geometrías complejas a través de un proceso de deformación plástica: el bruñido con bola. Este proceso puede sustituir al habitualmente utilizado en este tipo de superficies, específicamente el pulido manual. Como característica fundamental del mismo, se puede decir que es un proceso automatizado que se desarrolla en la propia máquina donde está siendo elaborada la pieza en cuestión.

Para llevar a cabo este estudio se definen tres etapas. En la primera se desarrolla, en pasos sucesivos, un modelo físico para el proceso; a través del cual se podrá describir el fenómeno que ocurre durante el bruñido con bola. El objetivo final, es saber que parámetros son necesarios definir y ajustar durante la aplicación de dicho proceso. Se parte de hacer un análisis de fuerzas sobre un elemento diferencial de área y se van incorporando al modelo, las variables que están presentes en el sistema. El resultado final es un modelo en que los valores teóricos de presión se ven afectados por la influencia de los fenómenos que están presente en el sistema analizado, como son la velocidad con la que se deforma el material y el efecto del endurecimiento que va sufriendo el mismo a medida que va desarrollándose el proceso.

Una vez obtenido el modelo se realiza la caracterización a través de ensayos del material de las piezas de trabajo para poder introducir sus propiedades en el mismo y a continuación se diseñan y realizan los experimentos necesarios para validar los resultados obtenidos.

En una segunda etapa, se adicionan al modelo físico algunas variables no consideradas explícitamente hasta el momento, como el ancho de pasada lateral de la herramienta, la estrategia de mecanizado a seguir en el proceso y la influencia sobre la fuerza de bruñido, de la presión hidráulica del sistema y la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta. Además se ajusta el modelo para el bruñido de superficies complejas. Todo esto se lleva a cabo a través del diseño de experimentos. Los resultados obtenidos se llevan a una hoja resumen donde se puede observar lo que se esperan obtener con el proceso bajo determinadas condiciones de trabajo. Como indicadores de la bondad del modelo se miden la rugosidad superficial media Ra y la rugosidad máxima total en la longitud de evaluación Rt .

En la tercera y última etapa, se realiza un estudio sobre la dureza superficial y las tensiones residuales en el material de las piezas ensayadas, para determinar los valores añadidos que aporta el proceso.

Al finalizar se llegan a conclusiones importantes sobre el proceso de bruñido con bola estudiado y sobre el cumplimiento de los objetivos planteados en la tesis. Por otra parte se recomienda toda una serie de trabajos pendientes a los cuales se les podría dar solución en un futuro inmediato.

SUMMARY

It is quite easy to improve the surface finish of a flat surface or a cylindrical one by using a grinding process. But achieving a good finish on a surface of complex geometry is a difficult task. And this is one of the challenges the manufacturing industry faces today.

The geometry of many mechanical parts such as moulds and dies is characterised by several complex surfaces. In general almost each trade product has at least one critical component made in a mould or die. That is why this issue has been widely studied by researchers in the manufacturing industry.

This thesis aims to research on how to improve the surface finish of complex geometry through a process of plastic deformation; the ball burnishing. This process can replace the one commonly used for this kind of surface, specially the manual polishing. The main feature is an automated process that takes place in the machine itself where the part is actually being produced.

To carry out this research three stages need to be defined. At the first one, a physical model is gradually developed for the process. This model allows to describe the phenomenon happening before the ball burnishing. Its purpose is to define and to set the parameters required for implementing the process. First an analysis of forces is made on an area differential element and the system variables are then added to the model. The final outcome is a model with theoretical pressure values which are determined by the phenomena happening in the analysed system; such as the speed at which the material is deformed and the hardening effect while the process develops.

Once the model has been made, the workpiece characterisation is tested to introduce the properties into the model and after that the required tests are made to validate the results.

At a second stage following variables not openly considered up to the previous stage are added to the physical model: the side cut width of the tool, the machining strategy to be applied to the process, the influence on the burnishing strength by the hydraulic pressure system, as well as the penetration depth of the tool head. The model for burnishing of complex surfaces is also fitted. And all this is done by means of the

Design of Experiments techniques (DOE). The outcome is offered on a summary sheet that shows what the process can deliver under certain conditions. As goodness indicators for the model the average surface roughness R_a and the total maximum roughness are measured in the evaluation length R_t .

At the third and final stage the surface hardness and the residual stress of the tested workpiece material are verified in order to determine the added values that the process is capable of providing.

Finally interesting conclusions are drawn about the ball burnishing process and about how to reach the goals outlined in this thesis. Furthermore a range of pending research studies still need to be done to find solutions in the near future.

RÉSUMÉ

Améliorer la finition superficielle d'une pièce plane ou cylindrique, peut se faire d'une manière relativement simple, utilisant pour cela un processus de rectification. Cependant obtenir un bon état superficiel sur une surface de configuration géométrique complexe, est un problème difficile de traiter et est l'un des objectifs qu'a l'industrie de la manufacture de pièces au jour d'aujourd'hui.

Beaucoup d'éléments mécaniques comme les moules et les matrices se caractérisent pour avoir dans leur géométrie plusieurs surfaces complexes. De manière général, quasiment chaque produit commercial contient, au moins, un composant critique usiné dans un moule ou une matrice. C'est par ce que ce problème est amplement étudié par les chercheurs de la branche de la fabrication mécanique.

Dans cette thèse s'étudie comment améliorer la finition de la surface de géométries complexes à travers d'un processus de déformation plastique: rodage bille. Ce processus peut se substituer à l'habituellement utilisé dans ce type de surfaces, spécialement le polissage manuel. La caractéristique principale de celui-ci, on peut dire que c'est un procédé automatisé qui se développe dans la même machine où est entrain d'être élaboré la pièce en question.

Pour mener à bien cette étude, on définit trois étapes. Dans la première, on développe, en phases successives, un modèle physique pour le processus; a travers duquel on pourra décrire le phénomène qui se développe durant le rodage bille. L'objectif final, est de savoir quels paramètres sont nécessaires d'être définis et ajustés durant l'application du dit processus. On commence par faire une analyse des forces sur un élément différentiel d'une aire et on continue en s'incorporant dans le modèle, les variables présentes dans le système. Le résultat final est un modèle dans lesquelles les valeurs théoriques de pression sont affectées par l'influence des phénomènes présents dans le système analysé, comme sont la vitesse avec laquelle se déforme le matériau et l'effet de l'endurcissement que souffre lui même a la mesure que se développe le processus.

Une fois obtenu le modèle on réalise la caractérisation à travers d'essais du matériel des pièces du travail pour pouvoir introduire ses propriétés en lui-même et à

continuation on dessine et on réalise les expériences nécessaires pour valider les résultats obtenus.

Dans une seconde étape, on additionne au modèle physique plusieurs variables non considérés explicitement jusqu'au moment, comme est la largeur du passant latéral, la stratégie de l'usinage à suivre durant le processus et l'influence sur la force du bruni, de la pression hydraulique du système et la profondeur de la pénétration de l'outil. En plus on prépare le modèle pour le bruni de surfaces complexes. Tout ceci s'achève a travers du design d'expériences. Les résultats obtenus s'écrivent dans une feuille résumée ou on peut observer ce que l'on espère obtenir avec le processus sous certaines conditions de travail. Comme indications de la bienveillance du modèle on mesure la rugosité moyenne de la surface Ra et la rugosité maximale totale dans la longitude d'évaluation Rt .

Dans la troisième et dernière étape, on réalise une étude sur la dureté superficielle et les contraintes résiduelles dans le matériau des échantillons essayés, pour déterminer les valeurs supplémentaires qu'apporte le procédé.

Une fois finalisée, on arrive à des conclusions importantes sur le processus du rodage bille étudié et sur l'accomplissement des objectifs de la thèse. D'autre part, on recommande toute une série de travaux auxquels on peut donner une solution dans un futur immédiat.

Nomenclatura

<i>Ra</i>	Rugosidad superficial media en μm
<i>Rt</i>	Rugosidad máxima total en la longitud de evaluación en μm
<i>Ra par.</i>	Rugosidad superficial media medida en el sentido paralelo al avance del fresado en μm
<i>Rt par.</i>	Rugosidad máxima pico –valle medida en el sentido paralelo al avance del fresado en μm
<i>Ra per.</i>	Rugosidad superficial media medida en el sentido perpendicular al avance del fresado en μm
<i>Rt per.</i>	Rugosidad máxima pico – valle medida en el sentido perpendicular al avance del fresado en μm
<i>A</i>	Área de contacto bola- herramienta en mm^2
<i>F</i>	Fuerza de bruñido en N
σ	Esfuerzo de fluencia del material en N/mm^2
σ_x	Esfuerzo normal en la dirección horizontal en N/mm^2 o Esfuerzo sobre el elemento diferencial de área en la dirección x
<i>R_B</i>	Radio de la bola de la herramienta de bruñido en mm
<i>D_B</i>	Díámetro de la bola de la herramienta de bruñido en mm
<i>t</i>	Profundidad de penetración del cabezal de la herramienta de bruñido en mm
<i>HV</i>	Dureza Vickers
<i>HRC</i>	Dureza Rockwell C
<i>HRH</i>	Dureza Rockwell H
<i>P</i>	Presión hidráulica que ejerce la bomba de la máquina sobre la herramienta en bar
<i>e/Rt</i>	Relación adimensional entre el salto y la rugosidad superficial máxima pico–valle
<i>a</i>	Velocidad de avance de la herramienta de bruñido mm/rev
<i>p</i>	Distancia lateral entre pasadas de la herramienta o paso lateral en mm
<i>D</i>	Dirección seguida con la herramienta respecto a la dirección del mecanizado previo
<i>V</i>	Velocidad de rotación del husillo en min^{-1}
<i>B</i>	Número adimensional que define el proceso del bruñido
<i>e</i>	Salto entre la rugosidad obtenida en el perfil bruñido y en el perfil fresado de la pieza de trabajo en μm
<i>H</i>	Intensidad de la tasa de la velocidad de deformación del material

L_m	Altura de las probetas de los experimentos en mm
L	Longitud del arco de contacto entre la bola y la pieza en mm
h	Altura del elemento diferencial de área respecto al perfil bruñido en mm
θ	Ángulo de inclinación de la dirección de la presión P en °
α	Ángulo de la cuerda de contacto entre la bola y la pieza de trabajo en °
dx	Ancho del elemento diferencial de área en mm
$2K$	Tensión límite a corte puro del material en N/ mm ²
γ	Tensión umbral límite a tracción pura en N/ mm ²
r_h	Radio de la punta de los filos de la fresa en mm
n	Coefficiente adimensional de auto endurecimiento del material
ε	Deformación real inducida en el material a tracción en mm
ε_x	Componente de la deformación real inducida en el material a tracción en la dirección x en mm
u	Componente de la velocidad de la bola de la herramienta en la dirección x en mm/min
ρ	Densidad del material de la pieza de trabajo en gr/mm ³
E	Módulo de <i>Young</i> del material de la pieza de trabajo en N/mm ²
r	Radio de curvatura de la pieza bruñida en mm
λ	Longitud de onda de los rayos x en nm
m	Número entero de longitudes de onda que hay entre rebotes
d	Distancia entre los planos de la red cristalina en nm
α	Ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión en °
φ	Ángulo de inclinación de los cristales de la estructura del material en °
V_x	Campo de velocidades en la dirección x
Q_x	Caudal de material que cruza un elemento infinitesimal de longitud Δx

Capítulo 1. Introducción

Un buen acabado superficial en una superficie de configuración geométrica compleja como puede ser alguna de las partes de un molde o matriz 3D es un problema difícil de tratar. Una pieza plana, cilíndrica o cónica, puede ser elaborada con cierta facilidad en una rectificadora, con lo cual mejorar su acabado es relativamente sencillo. Cuando la superficie a elaborar tiene una forma compleja, mejorar su acabado superficial ya no es tan sencillo y es entonces cuando este proceso se convierte en un problema.

En esta tesis se estudia como mejorar el acabado superficial de geometrías complejas a través de un proceso de deformación plástica. Dicho proceso puede sustituir al habitualmente utilizado en este tipo de superficies, específicamente el pulido manual. Como característica fundamental del mismo, se puede decir que es un proceso automatizado que se desarrolla en la propia máquina donde está siendo elaborada la pieza en cuestión.

A través de una operación de bruñido con bola (Y.C. Yen *et al.*, 2005), se pueden elaborar superficies de configuración compleja dejando en las mismas un buen acabado superficial. Como se puede observar en la figura 1.1, este proceso se desarrolla utilizando una herramienta que está montada en un cabezal hidráulico, el cual le aplica cierta presión a una bola. Esta bola deforma el material de las crestas existentes en la topografía superficial dejada por el mecanizado previo. Por lo tanto, producto del proceso de bruñido con bola, la topografía superficial se vuelve más plana y mucho más regular que la que tenía la pieza anteriormente.

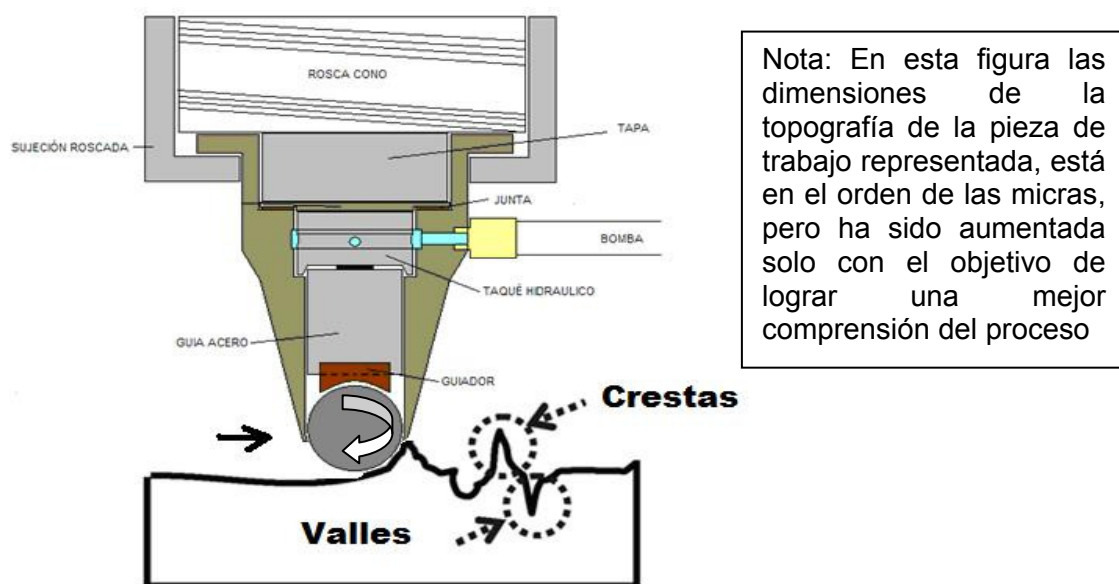


Figura 1.1. Esquema del proceso de Bruñido con Bola

Para llevar a cabo dicho estudio, se propone desarrollar un modelo físico que ayude a predecir el comportamiento de una superficie metálica que es deformada plásticamente con el objetivo de disminuir sus asperezas superficiales.

Para llegar al modelo final se realizan varios pasos intermedios, en los cuales se van incorporando el efecto de cada uno de los fenómenos independientes que interactúan en el proceso de bruñido. Específicamente se tiene en cuenta el efecto de la velocidad con la que se deforma el material y el autoendurecimiento que va sufriendo el mismo durante su deformación.

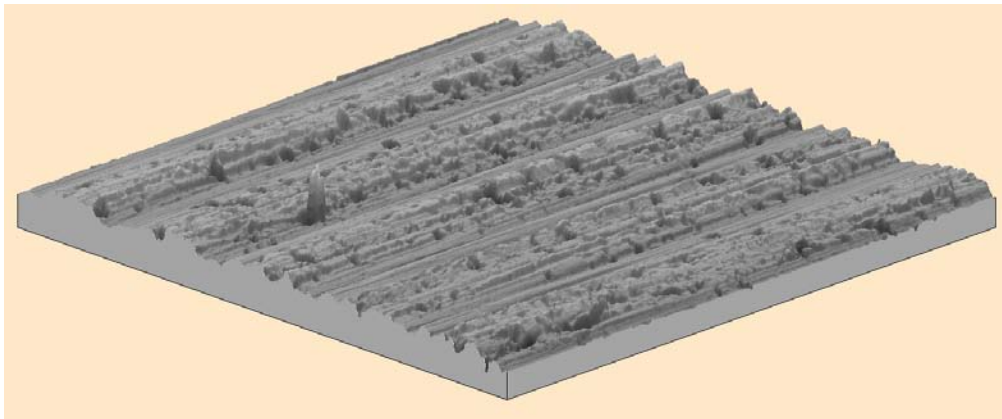


Figura 1.2. Perfil 3D de rugosidad superficial de una pieza mecanizada

El modelo es obtenido a través de la sumatoria de fuerzas sobre un elemento diferencial de área de la pieza de trabajo. A partir de aquí se obtiene una ecuación diferencial ordinaria, la cual es resuelta por el método de diferencias finitas. Con esta ecuación se puede calcular la presión necesaria para deformar la superficie rugosa de un cuerpo en función de las variables que intervienen en el problema. A continuación se valida con resultados experimentales y se ajusta a través de técnicas de diseño de experimentos.

De esta manera se obtienen una serie de resultados que se reflejarán en una tabla de recomendaciones, donde se describen los valores óptimos de los parámetros del proceso, así como el nivel de influencia de los mismos sobre los valores de rugosidad superficial obtenidos en las superficies bruñidas.

También se estudian los valores añadidos de este proceso, como el aumento de la dureza superficial del material de la pieza, las tensiones superficiales que quedan en la misma y su influencia en el aumento de la resistencia a la fatiga.

1.1. Problemática del acabado superficial en superficies complejas

Muchos elementos mecánicos como los moldes y matrices se caracterizan por tener en su geometría varias superficies complejas. La habilidad para formar estas superficies en los materiales, además de los grandes volúmenes de producción, es un aspecto importante a tener en cuenta en la manufactura moderna. De manera general casi cada producto comercial contiene, al menos, un componente crítico hecho en un molde o una matriz de ahí que se pueda decir con cierta certeza que la vida moderna sería complicada si no existiesen los moldes y/o las matrices.

Dado que el diseño en ingeniería se ha vuelto más sofisticado y atrevido, cosa que ha sido propiciada por los avances en la revolución informática y el desarrollo de nuevas aplicaciones CAD-CAM, las matrices y los moldes de hoy son más complejos y tienen tolerancias muy estrechas. Técnicamente, estos moldes y matrices son difíciles de producir. Al mismo tiempo, el ciclo de vida de los productos y su crecimiento se están reduciendo. El período que transcurre entre la concepción del producto y su introducción en el mercado (*time to market*) tiene que ser reducido. Además, las presiones que genera la producción crean una progresiva demanda de moldes y matrices que implica la fabricación de más piezas por hora, más trabajo con menos mantenimiento, menos consumo de energía, más resistencia al desgaste, menos tiempo de puesta a punto y un alto grado de flexibilidad.

Todas estas condiciones influyen en la manera en que la industria en general y los talleres de matricería eligen sus opciones de mecanizado para los componentes de sus moldes y matrices, en especial aquellos que tienen superficies críticas. Eso sí, la mayoría de procesos de acabado sobre moldes y matrices se realizan en la actualidad de forma manual (figura 1.3). Estas operaciones consumen una gran cantidad de tiempo y requieren mano de obra especializada. Desde principios de los años 90 muchos autores han tratado de automatizar este tipo de procesos (Ideko, proyecto Amadeus), sin embargo estos trabajos tienen en común que resuelven sólo aspectos parciales del problema sin tener en cuenta aspectos muy relevantes en el entorno moldista.



Figura 1.3. Acabado manual de superficies complejas de un molde

Teniendo en cuenta el problema que representa el realizar estas operaciones de forma manual, en esta tesis se estudia un proceso de bruñido con bola. Este proceso se puede automatizar y realizar en la misma máquina de control numérico donde se realiza el mecanizado previo al acabado de la pieza. En la figura 1.4 se puede ver como se bruñe una superficie cóncava de una pieza, con la herramienta desarrollada en esta tesis.



Figura 1.4. Acabado de una superficie cóncava utilizando el Bruñido con bola utilizando la herramienta desarrollada

Para realizar esta investigación se han de hacer explícitos varios cuestionamientos que en definitiva son los que de alguna manera llevan a desarrollar la misma.

1.2. Cuestionamientos previos

1. ¿Se podría utilizar un procedimiento diferente del habitual, como puede ser un proceso de deformación plástica, para mejorar el acabado superficial de superficies complejas?
2. ¿Se conoce otro sistema o proceso novedoso, por el cual se pueda sustituir el actual?

Si se opta por mejorar el acabado superficial por deformación plástica:

3. ¿Sería posible simular a través de un modelo matemático el proceso de deformación plástica de un cuerpo con una geometría determinada?
4. ¿Se puede establecer alguna relación entre cómo y cuánto se deforma un cuerpo?
5. ¿Se podría llegar a mejorar la rugosidad de una superficie deformando la misma?
6. ¿Este proceso podría tener algún valor añadido?

A partir de estos cuestionamientos se definen una serie de hipótesis de partida para este trabajo.

1.3. Hipótesis planteadas

1. La deformación plástica de una superficie compleja se puede ejecutar y controlar utilizando una operación de bruñido con bola.
2. La rugosidad de una superficie puede ser mejorada disminuyendo la altura de sus irregularidades a través de un proceso de deformación y aplastamiento de las mismas utilizando una bola.
3. El proceso de bruñido con bola aumenta la dureza de la superficie que es tratada con el mismo.
4. Después de realizar una operación de bruñido con bola, aparecen tensiones superficiales compresivas en la superficie del material trabajado que ayudan a aumentar su vida útil a fatiga.

En función de estas hipótesis se establecen los objetivos de este trabajo.

1.4. Objetivos

1.4.1. *Objetivo general*

Mejorar el acabado superficial de superficies mecanizadas, a través de la utilización de un proceso de deformación plástica, en este caso el bruñido con bola.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar el modelo físico que defina el proceso de deformación plástica de la superficie rugosa de un material.
2. Diseñar y fabricar las instalaciones, la herramienta, los útiles para ejecutar las experiencias prácticas que validen el modelo y la instrumentación necesaria para hacer las mediciones.
3. Ejecutar las experiencias prácticas en cuestión para validar el modelo desarrollado y para comprobar los beneficios que aporta el proceso al material de las piezas ensayadas.
4. Comparar los resultados obtenidos con los de otros investigadores que están trabajando en el tema.

1.5. Metodología

Esta investigación se llevó a cabo en diferentes etapas.

Primera etapa:

- a. Se desarrolla en pasos sucesivos, el modelo matemático necesario para describir el fenómeno que ocurre durante el proceso de bruñido con bola. El objetivo final, es saber que parámetros son necesarios definir y ajustar durante la aplicación de dicho proceso. Se parte de hacer un análisis de fuerzas sobre un elemento diferencial de área y se van incorporando las variables que están presentes en el sistema al modelo. El resultado final es un modelo en que los valores teóricos de presión se ven afectados por la influencia de los fenómenos que están presente en el sistema analizado, como son la velocidad con la que se deforma el material y el efecto del endurecimiento que va sufriendo el mismo a medida que va desarrollándose el proceso.
- b. Para completar el modelo es necesario hacer una caracterización a través de ensayos del material de las piezas de trabajo para poder introducir sus propiedades en el modelo.
- c. A continuación se diseñan y realizan los experimentos necesarios para validar los resultados obtenidos con el modelo físico.

Segunda etapa:

Se ajusta el modelo para el bruñido de superficies complejas a través del diseño de experimentos y se llevan los mismos a una hoja resumen donde se puede observar los resultados que se esperan obtener con el proceso bajo determinadas condiciones de trabajo.

Tercera etapa:

Se realiza un estudio sobre las tensiones residuales y la dureza superficial en el material de las piezas ensayadas, para determinar los valores añadidos que aporta el proceso.

1.6. Estructura de la tesis

Esta tesis está organizada en los siguientes capítulos:

- Capítulo 1: Se presenta la introducción, la justificación, las hipótesis planteadas, los objetivos tanto generales como específicos, la metodología desarrollada para llevar a cabo la investigación, la estructura del contenido, las publicaciones que se han realizado durante el transcurso del desarrollo de este trabajo y los alcances y contribuciones de la tesis.
- Capítulo 2: Estado del arte en los temas relacionados con el presente trabajo de investigación.
- Capítulo 3: Se presenta y describe la herramienta diseñada, así como su funcionamiento y el proceso que realiza la misma.
- Capítulo 4: Trata sobre el desarrollo del modelo físico para predecir las presiones necesarias para deformar una superficie metálica, así como los ensayos necesarios para caracterizar el material de las piezas de trabajo y obtener las propiedades que se deben introducir en el modelo obtenido. También se presentan los resultados de los experimentos realizados para validar los resultados teóricos obtenidos
- Capítulo 5: Se describen los experimentos realizados para demostrar la validez del proceso de bruñido con bola para mejorar el acabado superficial de piezas con superficies planas, cóncavas y convexas de diferentes materiales.
- Capítulo 6: Trata sobre los experimentos realizados para demostrar los valores añadidos que tiene el proceso de bruñido con bola. Para ello se realizan mediciones de dureza, tensiones residuales y un análisis de la estructura a través de la microscopía electrónica de barrido.
- Capítulo 7: Se muestran las conclusiones generales de la investigación y el trabajo a realizar en el futuro a partir de los resultados obtenidos.

1.7. Publicaciones realizadas

- 1- GONZÁLEZ ROJAS, H.A.; TRAVIESO RODRÍGUEZ, J.A. VIVANCOS CALVET, J. **“New Analytical Solution to Predict the Pressure in the Upsetting Process”**. Proceedings of the 11th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated

- Technology”, TMT 2007, Hammamet, Tunisia, 5-9 September, 2007. ISBN-9789958617348
- 2- GONZÁLEZ ROJAS, H.A.; TRAVIESO RODRÍGUEZ, J.A. **“Analytical solution and experimental data to predict the pressure in the deformation process of a cylindrical body in case of plane tensions”**. Proceedings of the 12th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, TMT 2008, Turkey, 24-28 August, 2008. ISBN- 9789958617348
 - 3- TRAVIESO RODRÍGUEZ, J.A.; GONZÁLEZ ROJAS, H.A., et al. **“Modelo matemático para predecir las presiones de trabajo en el proceso de Bruñido con bola”**. Proceedings de la XIV Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura (CCIA14), Cuba, 1 al 5 de diciembre de 2008.
 - 4- TRAVIESO RODRÍGUEZ, J.A.; GONZÁLEZ ROJAS, H.A. **“Analytical solution and experimental data to predict the pressure in the deformation process of a cylindrical body in cases of plane strain/stress”**. Proceedings of the 3rd Manufacturing Engineering Society International Conference (MESIC’09), Alcoy, 17-19 June, 2009. ISBN- 9788461331666
 - 5- TRAVIESO RODRÍGUEZ, J.A.; GONZÁLEZ ROJAS, H.A. **“Analytical solution and experimental data to predict the pressure in the deformation process of a cylindrical body in cases of plane strain/stress”**. AIP Conference Proceedings Volume 1181. Third manufacturing engineering society international conference: MESIC-09, Alcoy, 17-19 June, 2009. ISBN- 9780735407220
 - 6- TRAVIESO RODRÍGUEZ, J.A.; GONZÁLEZ ROJAS, H.A. **“Solución analítica para el problema de deformación plástica de un cuerpo cilíndrico”**. Proceedings del 9º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica (CIBIM’09), Las Palmas de Gran Canaria, 17-20 de noviembre de 2009. ISBN- 9788469285169
 - 7- GONZÁLEZ ROJAS, H.; TRAVIESO RODRÍGUEZ, J.A; SCHULZ PÉREZ, R. **“Ball Burnishing Process to improve Surface Roughness”**. Proceedings of the 13th International Research/Expert Conference “Trends in the Development of Machinery and Associated Technology”, TMT 2009, Hammamet, Tunisia, 16-21 October, 2009. ISSN 1840-4944.
 - 8- TRAVIESO RODRÍGUEZ, J.A; GONZÁLEZ ROJAS, H.; DESSEIN, G. **“Improved surface finish of complex geometry pieces, through a ball burnishing process”**. Pyrenees Mediterranean Manufacturing Symposium, Montpellier, Francia, 16-21 Abril 2010.

1.8. Alcance y contribución de la tesis

Las contribuciones que se realizan con esta tesis son fundamentalmente:

1. Se diseña, fabrica y pone en práctica una herramienta capaz de realizar el proceso de bruñido con bola.
2. Se obtienen un modelo para predecir las fuerzas de bruñido. Este modelo surge a partir del análisis físico del fenómeno de deformación plástica que ocurre en el material y no a partir de resultados experimentales o por el método de elementos finitos (MEF), como es el caso de los encontrados en la bibliografía. Es un modelo analítico que además considera el endurecimiento por deformación que ocurre en el material.
3. Se demuestra que este proceso es capaz de mejorar los acabados superficiales de las piezas mecanizadas y aumentar su dureza superficial. También que se puede utilizar en superficies complejas, donde no es posible aplicar otro proceso automatizado de acabado superficial.
4. Se comprueba que el proceso de bruñido con bola también aumenta la calidad de la superficie tratada, al endurecerla y dejar en ella unas tensiones superficiales compresivas que aumentan, sobre todo, la vida a fatiga del material.

Capítulo 2. Estado del arte

Para llevar a cabo esta investigación se ha hecho una revisión de los trabajos desarrollados en tres temáticas fundamentales: las formas de mejorar el acabado superficial en las superficies complejas, la deformación plástica de materiales metálicos, y la mejora del acabado superficial de las piezas mecanizadas por deformación plástica a través del bruñido con bola. Se ha encontrado que hay diferentes investigadores que han trabajado en estos temas, los cuales han obtenido resultados, como los que se muestran a continuación. Estos resultados han sido considerados como referencias importantes en este trabajo, para definir sobre todo el punto de partida y los posibles resultados a obtener.

Se pasará a continuación a describir un resumen de los resultados de la búsqueda bibliográfica en las temáticas señaladas anteriormente.

2.1. Mejora del acabado superficial de superficies complejas

Existen diferentes procesos para mejorar el acabado superficial en piezas mecanizadas. Básicamente funcionan bajo dos principios fundamentales: por arranque de material o por deformación plástica. Cada uno de ellos es útil bajo ciertas circunstancias y para ciertos tipos de piezas (figura 2.1).

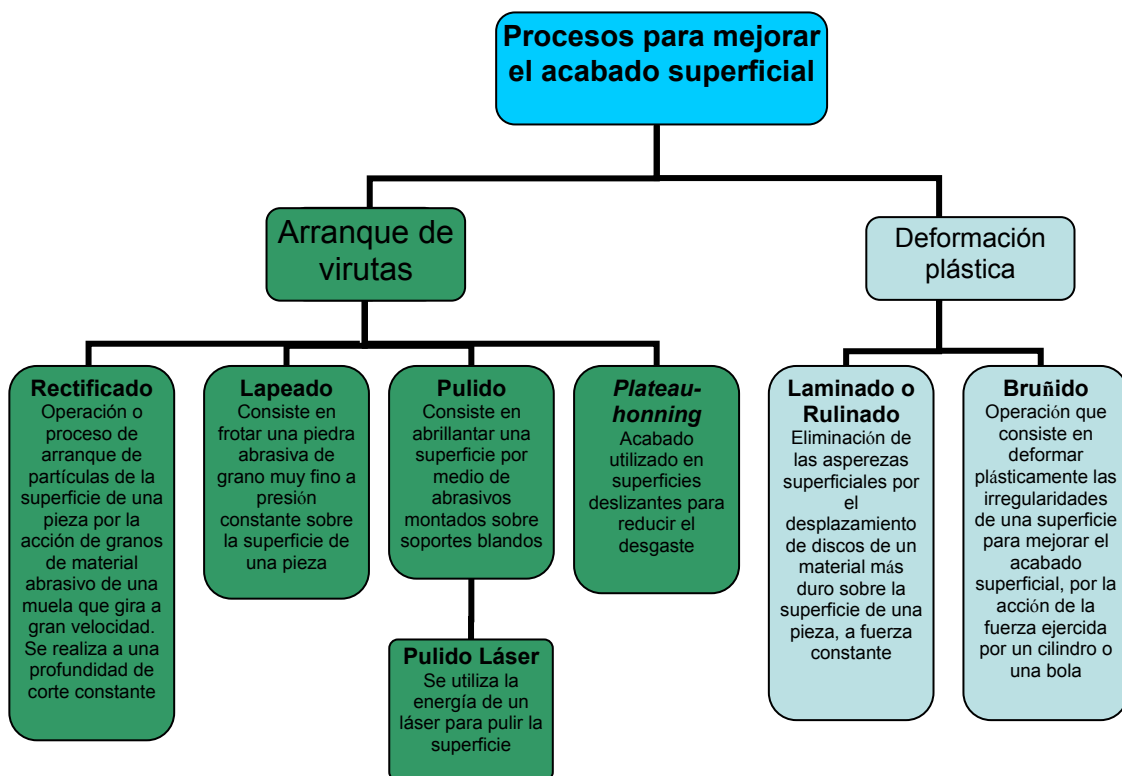


Figura 2.1. Procesos más comúnmente utilizados para mejorar el acabado superficial de piezas mecanizadas.

La mayoría de los procesos descritos anteriormente son fáciles de utilizar para superficies que no tengan demasiada complejidad, por ejemplo superficies planas o en revolución (cilíndricas o cónicas). La limitación de casi todos aparece cuando se trata de mejorar la rugosidad superficial de una superficie compleja como por ejemplo las de inclinación variable o ranuras muy estrechas, entre otras. En estos casos normalmente se suele acudir al proceso de pulido manual. El proceso de pulido manual se lleva a cabo con la intervención de un personal muy cualificado. Esto conlleva a que el proceso se vuelva muy lento y muy caro, lo cual no se puede permitir en la mayoría de las industrias dedicadas al mecanizado en los países desarrollados.

Existen referencias actuales de empresas e investigadores que tienen desarrolladas aplicaciones para mejorar el acabado superficial de superficies complejas automatizando el proceso de pulido.

Ejemplo de esto es la casa IDEKO, ubicada en el país Vasco, a través de su proyecto Amadeus, donde se dedicaron a estudiar como lograr una disminución del tiempo de pulido manual en moldes y troqueles a través de pulido automatizado. Consiguieron adaptar una máquina y desarrollar un dispositivo lijador (figura 2.2) capaz de trabajar según las condiciones de pulido necesarias dependiendo del sentido de plegado de la chapa en el proceso de estampado. Sin embargo, y pese a obtener una superficie con acabado superficial adecuado, los resultados obtenidos no son aplicables en procesos reales. Se considera que se debe de trabajar más en el proceso de rectificado y optimizado del sistema de pulido, cosas que no lograron realizar. Por otra parte también concluyeron que el proceso desarrollado tenía el problema de que como las superficies a elaborar no tienen una dureza superficial homogénea, este no es capaz de cambiar las condiciones de trabajo, según sea la dureza de la superficie a elaborar.



Figura 2.2. Imagen del dispositivo desarrollado por IDEKO

De todas formas y a pesar de las limitaciones esta es una de las soluciones ideadas para lograr sustituir el proceso de pulido manual de superficies complejas.

E. Ukar *et al*, 2009, propone también un proceso para sustituir el pulido manual de superficies complejas. En este caso es el pulido láser.

Este es un proceso que lleva más de una década siendo aplicado en la mejora superficial de elementos no metálicos como lentes ópticas u obleas de silicio. El proceso se basa en la fusión controlada de una capa microscópica de material, de modo que únicamente son fundidos parte de los picos de la topografía, rellenándose los valles con el material fundido y dando lugar a una superficie suavizada. En el pulido láser (figura 2.3), no se llega a vaporizar material, no siendo necesaria la aplicación pulsada del láser y siendo posible un procesamiento de la superficie con tasas de productividad más elevadas.

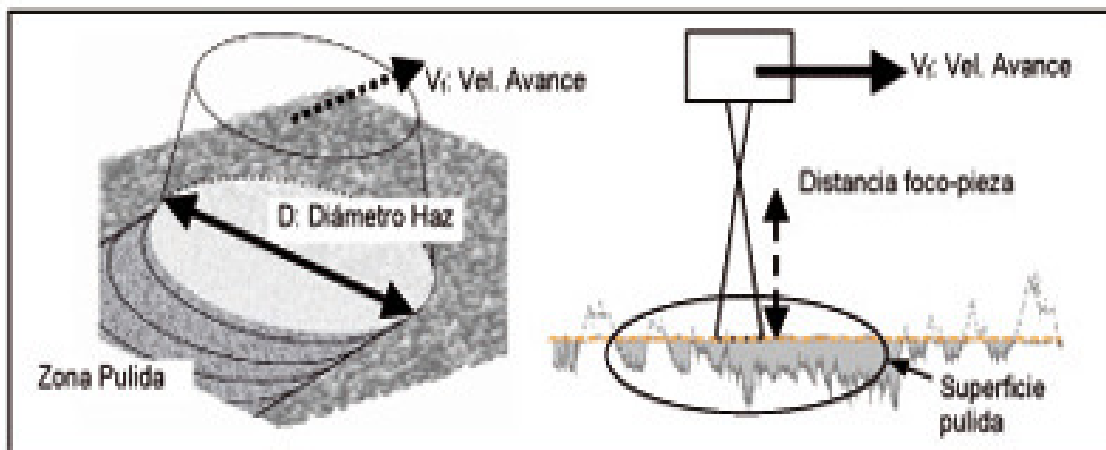


Figura 2.3. Imagen del proceso de pulido láser. (www.interempresas.net)

Actualmente se está estudiando la aplicación de este proceso sobre superficies metálicas, tanto a nivel macroscópico como microscópico, con reducciones de rugosidad del orden del 85% y con valores finales de rugosidad por debajo de $Ra = 1 \mu m$, dependiendo dicha reducción, de la rugosidad inicial de la superficie procesada. Si bien los resultados obtenidos con el proceso de pulido láser son destacables, se trata de un proceso que precisa una experimentación previa para la determinación de las condiciones óptimas de trabajo en función del tipo de láser, el material pulido y la rugosidad inicial. Esto hace que la aplicación industrial del proceso aún esté muy limitada.

2.2. Deformación plástica

Se hace una búsqueda bibliográfica en esta temática como punto de partida puesto que el proceso de bruñido con bola en estudio no es más que un proceso de deformación plástica de una superficie cuyo objetivo evidentemente es la mejora del acabado superficial de una pieza con forma plana o compleja.

Para analizar el proceso de deformación de las crestas de las irregularidades de una superficie las cuales tienen dimensiones muy pequeñas, es bueno primeramente analizar y entender como ocurre dicho proceso en superficies con dimensiones mayores. Por ello este segundo apartado es dedicado a hacer una revisión de los artículos publicados por diferentes investigadores en la temática de procesos de deformación plástica.

(X.L. Hu *et al.*, 2004), en su trabajo *“Experimental study and numerical simulation of the pressure distribution on the die surface during upsetting”*, han observado que la distribución de presión sobre la superficie de una pieza no es uniforme durante el proceso de Recalcado. Para comprobar este planteamiento, diseñaron un dispositivo experimental (figura 2.4) para medir la distribución de presiones y realizaron algunos experimentos con diferentes parámetros. El proceso también fue simulado con el *software DEFORM* y fue hecha una comparación entre los resultados teóricos y los experimentales.

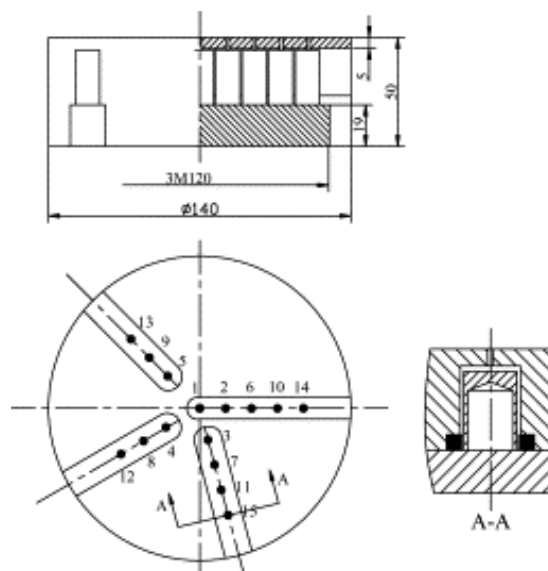


Figura 2.4. Instalación para medir fuerzas en el proceso de deformación plástica de una pieza cilíndrica sometida a presión, desarrollado por (X.L. Hu *et al.*, 2004)

Entre otros resultados, estos investigadores obtuvieron un gráfico como el que se muestra en la figura 2.5, donde relacionan la presiones medias necesarias a aplicar para que ocurra la deformación de un cuerpo de configuración cilíndrica, en función de la relación de esbeltez (diámetro / altura) de la pieza deformada; para diferentes coeficientes de fricción entre la pieza y el punto de aplicación de la fuerza.

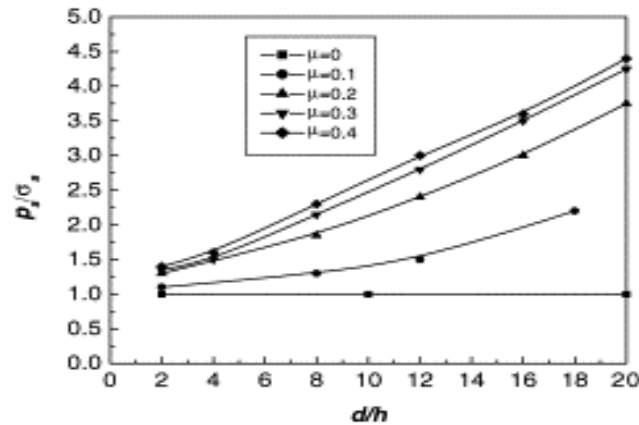


Figura 2.5. Gráfico que muestra la relación P media, D/h de un cuerpo cilíndrico sometido a deformación plástica (X.L. Hu et al., 2004)

(M. BAKHSHI-JOOYBARI, et al., 1996), presentan una simulación a través de elementos finitos y un estudio experimental del proceso de Recalcado. En este estudio se plantea que el Recalcado en matriz cerrada, (figura 2.6) a menudo forma parte de la secuencia para producir el acabado de un tocho a través de la forja de precisión, conclusión muy importante para el desarrollo de la investigación de la que es objeto el presente trabajo, puesto que se está intentando utilizar un proceso de deformación para dar acabado.

Por otra parte, realizaron experimentos para obtener la geometría de las piezas deformadas, y también las cargas de forjado en función del movimiento del punzón durante la ejecución del proceso. Utilizaron también un programa de elementos finitos para simular el proceso. Con el fin de obtener resultados reales de la simulación, llevaron a cabo experimentos preliminares para asegurar que los parámetros térmicos fueron introducidos correctamente. A partir de dichos resultados obtuvieron elementos para generar una base de datos para el diseño de matrices para forja.

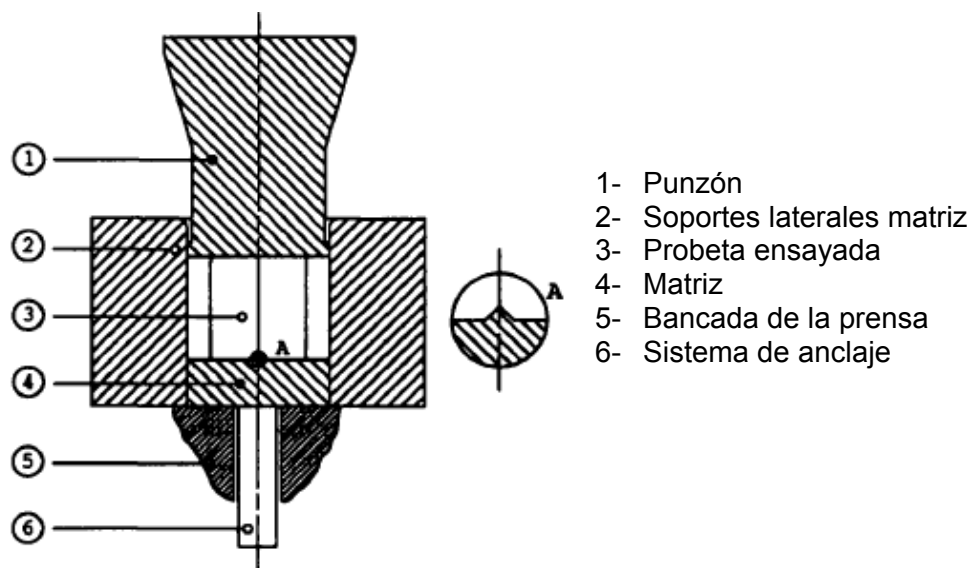


Figura 2.6. Instalación utilizada para las pruebas por M. BAKHSHI-JOOYBARI, et al., 1996

Otros artículos consultados (J.P.Wang, 2002; M. Plancak, et al., 2005; X. Peng & R. Balendra, 2004; A.M.S. Hamouda, et al., 1996; Zone-Ching Lin & Chun-kung Chen, 2006; Zhongjin Wang, et al., 2001), muestran que otros investigadores han obtenido resultados similares en esta temática, pero sin nuevas aportaciones de relevancia para lo que nos ocupa en este proyecto.

De manera general en todos los estudios consultados se pone de manifiesto que es importante conocer el valor de la fuerza que se debe aplicar al material de una pieza para que ésta sea deformada. Este valor influye en como ocurre el proceso, pero también hay otras variables que aparecen en el sistema como el coeficiente de fricción de la interfase pieza-elemento aplicador de la fuerza, temperatura, etc.

2.3. Mejora del acabado superficial a través del bruñido con bola

Respecto al tercer tema que ha ocupado la revisión bibliográfica, es decir la mejora del acabado superficial a través de un proceso de deformación como es el bruñido con bola, se han encontrado varias referencias de investigadores que han trabajado en el tema.

Un bruñido con bola es conveniente ya que la herramienta puede ser fácilmente instalada en la misma máquina CNC. La esfera puede tener diámetros entre 3-12 mm y actúa bajo la acción de una fuerza normal lo suficientemente alta como para deformar los picos del perfil de la superficie a tratar. La bola está en contacto sólo con

la superficie para bruñirla pero está libre para rodar sobre si misma, ya que los valores de fricción son muy pequeños. Como en el proceso de corte, la deformación plástica es producida sobre toda la superficie ya que la herramienta está continuamente incidiendo sobre la pieza de trabajo.

Algunos de los autores que han trabajado en esta línea como son: ROETTGER, K., 2002; KLOCKE, F. & LIERMANN, J., 1998; LUCA, L., 2002.; PREVEY, P.S., *et al.*, 2003 y ADEL MAHMOOD HASSAN & AYMAN MOHAMMAD MAQABLEH, 2000; NEMAT, M. & LYONS, A. C., 2000; YEN, Y.C. & ALTAN, T., 2004; han reportado datos experimentales al respecto.

En el trabajo, *"Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process"* desarrollado por Adel Mahmood Hassan & Sulieman Z.S. Al-Dhi, 1999; consideran el bruñido como un proceso de trabajo en frío, que puede ser usado para mejorar las características de la superficie. Según estos autores, la mayoría de los trabajos que han sido publicados con anterioridad a éste, se refieren a los efectos del proceso de bruñido en la rugosidad de la superficie y la dureza de la misma, pero según Adel Mahmood Hassan & Sulieman Z.S. Al-Dhi, se ha trabajado poco para demostrarlo, con lo cual este trabajo se dedicó a evaluar el aumento de la resistencia al desgaste producto de una operación de bruñido en una pieza.

Se llegó a la conclusión de que la fuerza de bruñido es el principal factor que afecta la resistencia al desgaste de la capa superficial de las piezas tratadas y que no hay una fuerza óptima de bruñido, con la que se obtienen los mejores resultados.

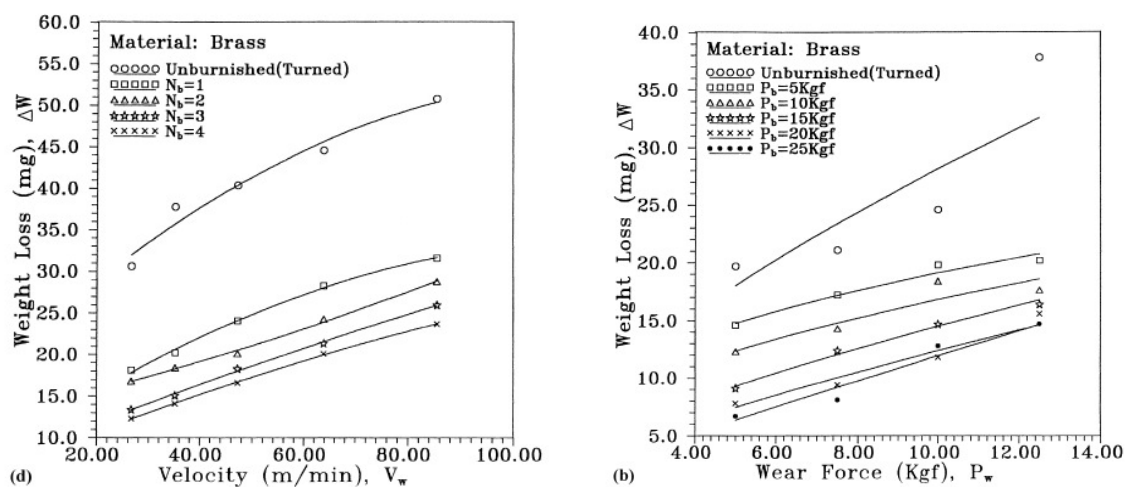


Figura 2.7. Influencia de la velocidad de rotación y la fuerza de contacto sobre la resistencia al desgaste de la pieza bruñida. (Adel Mahmood Hassan & Sulieman Z.S. Al-Dhi, 1999)

En los gráficos de la figura 2.7 se pueden observar los resultados que obtuvieron. Evaluaron la pérdida de peso en función de la velocidad y de la fuerza de contacto en el ensayo de evaluación de la resistencia al desgaste de la pieza bruñida.

Como se puede observar, se evalúa como influye el cambio de la velocidad de rotación del dispositivo de ensayo de desgaste y el incremento de la fuerza sobre la pérdida de masa en la pieza de trabajo que ya ha sido bruñida, lo cual da una idea de la resistencia al desgaste del material de la misma.

Las conclusiones más importantes de este trabajo son:

1. El proceso de bruñido con bola mejora el acabado y la dureza de la superficie de los metales no ferrosos en ciertos límites. Con el incremento de estas características se mejora la resistencia al desgaste de los materiales.
2. La variación de diferentes parámetros en el ensayo cambian la pérdida de peso del metal.
3. El aumento en la fuerza de bruñido o el número de pasadas de la herramienta de bruñido, por encima de determinados límites aumenta la resistencia al desgaste de las piezas.

Rajasekariah and Vaidyanathan, 1975 y más tarde Murthy and Kotiveerachari, 1981; estudiaron el efecto de la rugosidad superficial inicial de una pieza de acero sobre la rugosidad de su superficie después del bruñido. Demuestran que la rugosidad de la superficie bruñida aumenta con el aumento de la rugosidad inicial de las piezas estudiadas. Sus resultados también mostraron que la rugosidad del bruñido disminuye con el aumento de la fuerza ejercida durante el proceso sobre la superficie. Lamentablemente, no se proporcionó suficiente explicación de estos resultados en los estudios mencionados.

En el trabajo de (Adel Mahmood Hassan & Ayman Mohammad Maqableh, 2000), *“The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components”*; se obtuvieron los mismos resultados que en el caso de los autores anteriores, mediante la aplicación de distintas fuerzas, por ejemplo, 49, 147 y 245 N (correspondiente a 5, 15 y 25 kgf, según los autores); en piezas de bronce con diferentes rugosidades iniciales. En la figura 2.8 se puede ver que con el aumento de la rugosidad de la superficie inicial de las piezas de bronce, la rugosidad de la superficie bruñida se incrementa. También se puede ver que un aumento de la fuerza hace disminuir la rugosidad de la superficie bruñida.

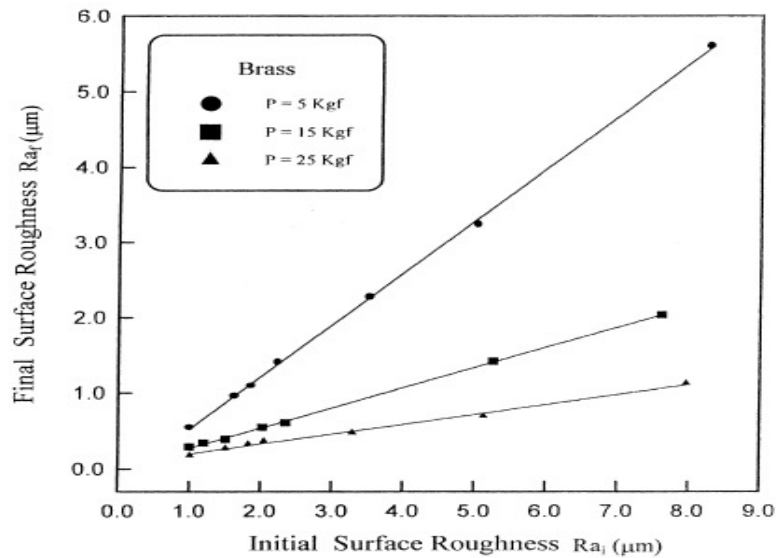


Figura 2.8. Efecto de la rugosidad superficial inicial sobre la rugosidad superficial final en piezas bruñidas de Bronce, con diferentes fuerzas aplicadas. Condiciones de bruñido: $V=26$ m/min, $f=0.08$ mm/rev, $N=1$, HV.127. (Adel Mahmood Hassan & Ayman Mohammad Maqableh, 2000)

Las siguientes, son las conclusiones más importantes que pueden extraerse de este trabajo:

1. Un aumento de la rugosidad de la superficie inicial, producirá un aumento de la rugosidad de la superficie final de las piezas bruñidas, pero no tiene ningún efecto sobre la dureza de la superficie de estas piezas metálicas.
2. Un aumento en la dureza de la superficie inicial causará una disminución en la reducción de la rugosidad de la superficie, y en el aumento de la dureza de la superficie.
3. Un aumento del diámetro de la bola causará una disminución en la rugosidad de la superficie final, la dureza y la resistencia al desgaste.
4. El uso de un lubricante en el proceso de bruñido provoca una reducción general de la rugosidad superficial y en la cuantía del aumento de la dureza, pero el cambio en la viscosidad del lubricante no parece tener efecto significativo en cualquiera de las propiedades mencionadas.

Aquí ya se va viendo mejor como actúan diferentes variables independientes sobre los resultados finales del proceso de bruñido, pero siempre demostrado desde el punto de vista experimental, sin entrar en el porque de cada una de estas conclusiones.

En un estudio de título “*Walzen hartgedrehter Oberflaechen*” (Bruñido de superficies duras), reportado por (ROETTGER, K., 2002), se presentan los resultados de las pruebas realizadas con herramientas que tenían diferentes valores de desgaste y para

diferentes condiciones de corte en el proceso de bruñido. De esta manera se evalúa como repercuten estos parámetros sobre el efecto provocado en las piezas de trabajo. Al trabajarse con herramientas y con condiciones de corte diferentes, se puede llegar a encontrar una relación entre estos parámetros y los valores de rugosidad superficial obtenidos con el bruñido. También se introduce el efecto de una variable más (la herramienta del proceso de mecanizado previo) sobre el resultado del bruñido.

En el mismo año 2002 Liu Luca, en su tesis doctoral *“Investigations into the use of Ball-Burnishing of Hardened Steel Components as a finishing Process”*, trabajó en el estudio del proceso de Bruñido con bola en piezas elaboradas en torno (superficies en revolución) en acero duro. Utilizando el método de elementos finitos (MEF) desarrolló modelos capaces de predecir el comportamiento de las superficies, en cuanto al acabado superficial, después de haber sido sometidas a este proceso. A partir de su trabajo llegó, entre otras, a las siguientes conclusiones útiles para esta investigación:

1. Una herramienta tipo bola sometida a una presión hidrostática, garantiza una forma eficaz de bruñido, y ofrece variadas ventajas, como son: que hay pequeños puntos de contacto entre la herramienta y la pieza, la libertad de rotación de la herramienta en cualquier dirección, la fuerza constante en el proceso, una correcta lubricación del proceso, la posibilidad de funcionamiento de la herramienta en una máquina de CNC.
2. El bruñido mejora la resistencia a la fatiga en el orden del 31% al 50%. Esto demuestra la eficacia de este proceso al aumentar el servicio de la pieza debido a la mejora de las propiedades de los materiales.

Este estudio demuestra la viabilidad del bruñido para ser utilizado como una alternativa del *grinding* y otros procesos de rectificado.

Otra referencia importante es el trabajo de (Fang-Jung Shiou & Chien-Hua Chen, 2003), de título *“Freeform surface finish of plastic injection mold by using ball-burnishing process”*, donde cuatro parámetros de bruñido, es decir, el material de la bola, el ancho de pasada lateral, la fuerza, y el avance, fueron seleccionados como los factores del diseño experimental tipo *Taguchi* del experimento para determinar los parámetros óptimos de bruñido, que tienen la influencia dominante sobre la rugosidad superficial.

Los parámetros óptimos de bruñido se encontraron después de realizar los experimentos de la *L18 Taguchi orthogonal table*, el análisis de varianza (ANOVA), y el experimento factorial completo. Los parámetros óptimos encontrados para el bruñido del acero para moldes de inyección de plástico IPDS5, fueron la combinación de la bola de carburo de tungsteno, el avance de 200 mm/min, la fuerza de bruñido de 300N, y la profundidad de bruñido de 40 μ m. La rugosidad de la superficie Ra de la muestra puede disminuir de 1 a 0.07 μ m utilizando los parámetros óptimos para el bruñido plano.

Los principales parámetros de bruñido con efectos significativos en la rugosidad de la superficie son el material de la bola o el rodillo, la fuerza de bruñido, la velocidad, la lubricación, el número de pasadas de bruñido. La mejora de la rugosidad de la superficie a través de este proceso en general oscila entre el 40 y el 90%.

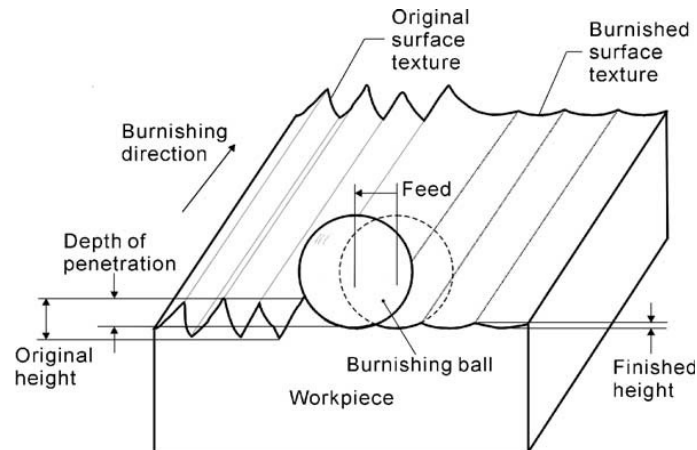


Figura 2.9. Diagrama esquemático para el proceso de bruñido con bola (Fang-Jung Shiou & Chien-Hua Chen, 2003)

Obtienen un modelo simplificado para estudiar las fuerzas necesarias en el proceso de bruñido. Consideran que el proceso de bruñido con bola es un proceso local de la deformación plástica que actúa sobre la superficie de la pieza. Estiman la fuerza mínima necesaria para bruñir. En la figura 2.9 se representa un corte de la superficie que se analiza por parte de estos autores, donde se puede ver las marcas de los desplazamientos longitudinales de la bola de la herramienta. Para obtener la fuerza de bruñido hacen algunas consideraciones para simplificar el modelo, como las siguientes:

1. La bola no se deforma durante el proceso de bruñido.
2. La fricción entre la bola y la muestra analizada se omite considerando que dicha interfase está constantemente lubricada.
3. La bola no rodará durante el proceso.
4. La fuerza de bruñido que se necesita es máxima.

La fuerza F (F_z en la figura 2.10), necesaria para el bruñido la estimaron a través de la expresión (1).

$$F = \sigma \cdot A \quad (1)$$

Donde, σ es el esfuerzo de fluencia del material y A es el área de contacto durante el proceso de bruñido.

El área de contacto A , figura 2.10, puede ser calculada a través de las expresiones (2 y 3).

$$A = \pi r_B^2 (-\cos \alpha + 1) \quad (2)$$

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{r_B - t}{r_B} \right) \quad (3)$$

Donde r_B es el radio de la bola (r en la figura 2.10); α es el ángulo que define el arco de circunferencia que representa la superficie de contacto y t es la profundidad de penetración de la misma (Depth of penetration, en la figura 2.10).

El esfuerzo de fluencia del material de la muestra PDS5 es de 915,57 N/mm² obtenido a través del ensayo de tracción. El rango óptimo de la profundidad de penetración está entre las 2 y las 10 micras. La fuerza mínima necesaria para el bruñido, se puede determinar mediante la sustitución de $r = 5$ mm, profundidad de penetración = 10 μ m en las expresiones. (1) - (3). La fuerza de bruñido mínimo calculado es de 143,82 N.

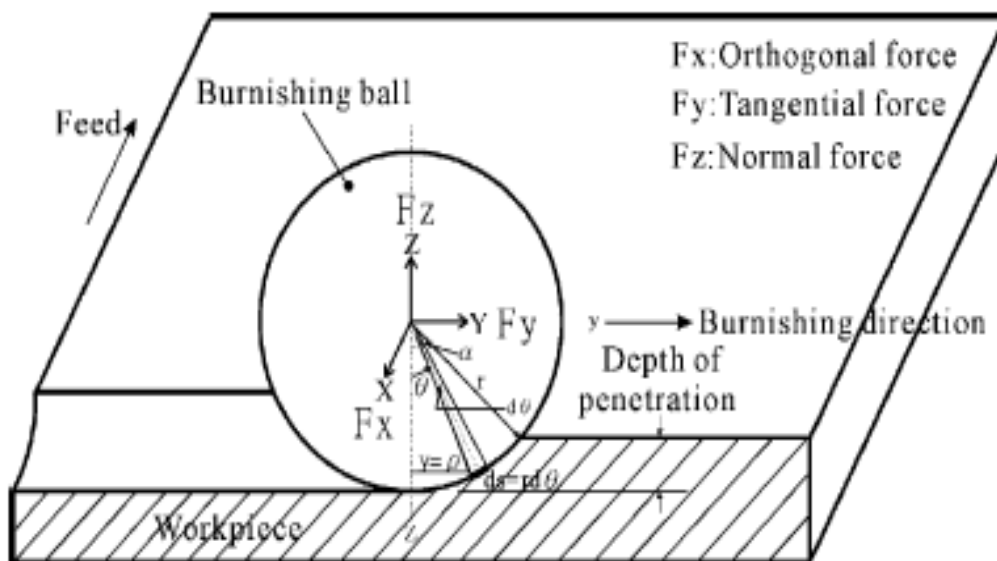


Figura 2.10. Representación de las fuerzas que actúan durante el proceso de bruñido.
(Fang-Jung Shiou & Chien-Hua Chen, 2003)

Las conclusiones a las que llegan son las siguientes:

1. Desarrollan con éxito el proceso de acabado superficial por bruñido con bola de una superficie libre de un molde de inyección de plástico en un centro de mecanizado en este trabajo.
2. La herramienta de bruñido con bola de nuevo diseño puede ser utilizada tanto para superficie planas como con forma libre.
3. La rugosidad de la superficie Ra de la muestra puede disminuir de 1 a 0,07 micras mediante el uso de los parámetros óptimos para el proceso de plano bruñido.
4. El valor de dureza de la muestra de la prueba aumentó de 338 HV que tenía inicialmente a 480 HV después del proceso de bruñido.
5. El espesor de la capa endurecida estaba a 30 micras cuando se aplicaban los parámetros óptimos para el bruñido plano en la cavidad de la superficie del molde de forma libre, la mejora de la rugosidad superficial de la parte de la inyección fue del 62,9% y en la superficie de forma libre fue del 77,8%.

En este caso el modelo desarrollado es simplificado y considera la superficie a deformar continua y sin rugosidad. Dentro de las consideraciones de partida se plantea que la bola no gira, cosa que es aceptable para simplificar el modelo. Por último la fuerza que se ejerce durante todo el proceso de bruñido no es constante, con lo cual no siempre es máxima.

Un año más tarde, (Yung-Chan Yen, 2004), en su tesis doctoral presentada en la *Ohio State University*, desarrolló una investigación que se centró en los procesos de acabado superficial en un torno. En primer lugar el acabado final convencional a través de un proceso de torneado y en segundo lugar el acabado a través del bruñido. Fueron encontrados los aspectos más críticos que determinan el estado final de la superficie y sus propiedades como la tensión residual, la microestructura y la microdureza. Además se desarrollaron dos modelos (2D y 3D) para optimizar la selección de los parámetros del proceso de bruñido (diámetro de la bola, presión, velocidad), utilizando el método de elementos finitos (MEF), los cuales fueron posteriormente evaluados con datos experimentales.

De las conclusiones obtenidas con cierta importancia para nuestro trabajo se puede decir que se obtuvo un modelo para optimizar el proceso de bruñido de piezas en revolución y que a partir de los resultados preliminares dicho proceso no tiene un efecto significativamente negativo en las tensiones residuales que quedan en el

material, cosa que hace pensar que es un buen proceso para dar acabado superficial a las superficies de las piezas a elaborar.

(Yen, Y. C. & ALTAN, T., 2005), también concluyeron en su trabajo *"Finite Element Modelling of Roller Burnishing Process"*, que el bruñido con bola es un proceso efectivo de mejora de la calidad superficial, dónde una bola cerámica gira sobre una superficie mecanizada bajo una alta presión, aplanándose los picos de las asperezas. Este proceso no solo mejora el acabado de la superficie sino que también imprime tensiones residuales compresivas favorables y aumenta la dureza en superficies funcionales, lo cual puede llevar a aumentar la vida útil cuando está presente el fenómeno de la fatiga. A esta conclusión ya habían llegado otros investigadores pero es interesante remarcar, que el proceso no solo mejora la rugosidad superficial, sino que además tiene otro valor añadido también muy importante: contribuye a aumentar la vida útil a fatiga del material.

En su estudio (Yen, Y. C. & ALTAN, T., 2005), estos investigadores desarrollaron los modelos 2D y 3D utilizando el método de elementos finitos (MEF) para el bruñido con bola. En el modelo evaluaron la deformación de la superficie y las tensiones residuales y compararon estos parámetros, para superficies elaboradas por torneado y superficies bruñidas. Las tensiones residuales previstas fueron validadas con los datos experimentales obtenidos a partir de la literatura.

Como una referencia importante, (N. López de la Calle et al., 2005) presentan un trabajo sobre la mejora de la rugosidad superficial de moldes y matrices mediante el bruñido con bola.

Estos investigadores basan su trabajo en resultados obtenidos de forma experimental. Desarrollan una herramienta para el bruñido con bola que se coloca en un centro de mecanizado a través de la cual se obtienen mejoras del acabado de moldes y matrices con diferentes aplicaciones.

Ejecutan ensayos de rugosidad superficial sobre varias probetas para diferentes valores de presión ejercida sobre la herramienta y parámetros de corte de la misma. Llegan a conclusiones muy positivas sobre la utilización del proceso de bruñido con bola para la mejora de la calidad superficial, como son:

1. La mejora más importante de la rugosidad se obtiene con la máxima presión de bruñido y en la dirección perpendicular a la del copiado.

2. Para materiales más duros, como materiales templados, es necesaria la aplicación de presiones de bruñido más elevadas.
3. El bruñido no afecta a las tolerancias dimensionales de la pieza, solo aplasta las crestas pero no deforma el material.

Estas conclusiones son muy interesantes para el presente proyecto, ya que hacen pensar que las hipótesis de partida están correctamente planteadas.

Más recientemente, (H. Hamadache et al, 2006) en su estudio "*Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing*", demuestran que el aumento de la dureza disminuye con un aumento en la frecuencia de rotación y el avance del bruñido, mientras que tanto la fuerza de bruñido como el número de pasadas aumentan la dureza.

A través de experimentos demostraron que una bola de diámetro de 10 mm, una velocidad de avance de 0,1 mm/min y una velocidad de 24 m/min; daban los mejores resultados para las condiciones de sus experimentos.

Llegaron además, a las siguientes conclusiones:

1. El bruñido con rodillo y con bola son dos procesos de tratamiento por deformación plástica en frío de las capas superficiales. Son la causa de un flujo de material que genera una fluencia en la superficie. Para el acero RB40, el rodillo de bruñido proporciona resultados de rugosidad óptimos, sobre todo cuando la calidad de la superficie inicial está alrededor de las 3 μm . En términos de dureza, el bruñido con bola se vuelve interesante. Para ambos casos, la rugosidad y la dureza óptima se obtienen con un régimen específico, cuyos parámetros decisivos son la fuerza aplicada, así como el número de pasadas de bruñido de la herramienta.
2. Respecto a la rugosidad, se recomienda limitar el número de pasadas a dos, mientras que para la mayor dureza, se aconseja ir hasta tres pasadas lo cual se asocia a un esfuerzo de alrededor de 150 N. El efecto de la fuerza de bruñido sobre la rugosidad está gobernado por una interacción entre los dos procesos. El aumento del número de revoluciones y la velocidad de avance no son deseables para los dos criterios de la superficie considerada aquí. Las capas superficiales de acero RB40 tratados por rodillos y por bola se comportan como superficies base y muestran una resistencia al desgaste apreciable.

En este estudio también se dan algunas recomendaciones que hacen ver que los valores de los parámetros que intervienen en el proceso son muy importantes para los resultados.

Luego, (N.S.M. El-Tayeb et al, 2007) en un artículo de nombre *“Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061”*, estudiaron el efecto de los parámetros de bruñido por rodillos, por ejemplo, la velocidad, la fuerza y el ancho de contacto del rodillo; sobre la calidad superficial y las propiedades tribológicas de las superficies bruñidas de aluminio 6061 para diferentes estrategias (orientaciones) de bruñido. Para ello se llevaron a cabo pruebas tribológicas en seco y lubricadas.

Las mediciones de rugosidad superficial y la dureza fueron realizadas antes y después del bruñido. La rugosidad superficial se midió utilizando un perfilómetro y la de dureza con un durómetro en la escala Rockwell.

Se realizaron pruebas tribológicas con el *disc-on-ring* y a través de técnicas *crosscylinder* para investigar el efecto de bruñido en los parámetros de fricción y resistencia al desgaste en condiciones de contacto seco y lubricado (figura 2.11).

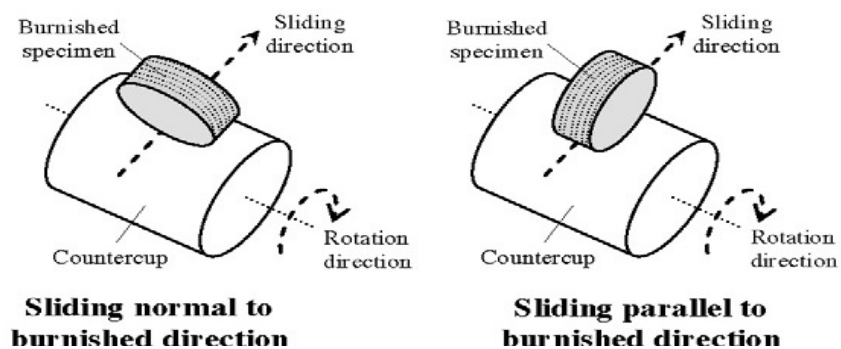


Figura 2.11. Esquema de la orientación del bruñido con respecto a la dirección de deslizamiento, bruñido en la dirección del fresado; bruñido cruzado a la dirección del fresado. (N.S.M. El-Tayeb et al, 2007)

Llegaron a las siguientes conclusiones:

1. Los rangos óptimos de velocidad y fuerza de bruñido son $250-420 \text{ min}^{-1}$ para 1 mm de profundidad de contacto del rodillo.

2. Para un valor de fuerza por encima 220 N se disminuye la rugosidad de la superficie en un 35%. Por debajo de este límite, la rugosidad de la superficie comienza a deteriorarse plásticamente.
3. El bruñido con profundidad de contacto menor a 1 mm es capaz de mejorar la rugosidad de la superficie hasta un 40%. Mientras tanto, la morfología de la superficie revela que el uso de rodillos con una profundidad de contacto mayor de 1,5 y 2 mm, deterioran la superficie por la deformación plástica excesiva.
4. Una velocidad de bruñido de 110 min^{-1} , provoca el más alto aumento en la dureza (hasta un 30%). Sin embargo, la mejora disminuye a medida que se aplican velocidades de bruñido más altas.
5. El coeficiente de fricción de las superficies bruñidas depende de la rugosidad de la superficie. Un bajo coeficiente de fricción corresponde con una rugosidad superficial baja, lo que puede atribuir a menos enclavamiento mecánico de las asperezas y de los restos atrapados.
6. El lubricante utilizado durante la prueba tribológica actúa como un refrigerante y un pulidor, resultando una superficie más suave en comparación con la superficie bruñida.
7. En condiciones de contacto en seco, la superficie bruñida, utilizando la menor profundidad de contacto del rodillo produce el más bajo coeficiente de fricción.
8. El aumento de la fuerza de bruñido tiene un impacto negativo sobre la resistencia al desgaste de las superficies de aluminio bruñido A96061.

Como comentarios se podría decir que en este trabajo se analiza la influencia de diferentes parámetros sobre los aspectos tribológicos, los cuales mejoran en la superficie de la pieza, después de haber sido bruñida.

Como última referencia encontrada recientemente (Ainoha Celaya et al, 2009), presentan un trabajo donde se plantea que resulta de gran interés el desarrollo de un modelo del proceso de bruñido, para obtener los resultados deseados en cuanto a acabados superficiales y tensiones residuales en las piezas. Con dicho modelo, se debe evaluar el efecto de los diferentes parámetros que actúan en el proceso. Se estudia, en este caso, un proceso de bruñido de una pieza elaborada en un torno (figura 2.12), pero tomando en cuenta el plano paralelo al eje del cilindro.

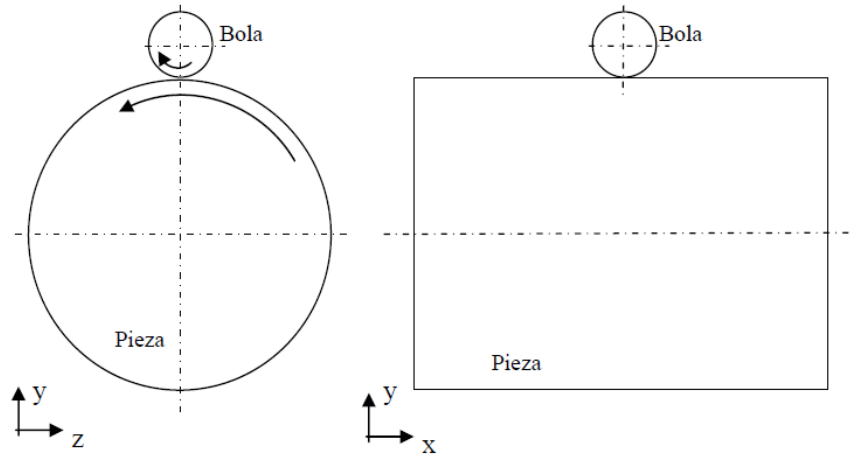


Figura 2.12. Esquema del proceso de bruñido descrito con el modelo desarrollado por (Ainoha Celaya et al, 2009)

El bruñido es un proceso tridimensional, sin embargo concluyen que el uso de modelos MEF tridimensionales es limitado debido al elevado tiempo requerido en las simulaciones. Por tanto, presentan un modelo de elementos finitos 2D del proceso de bruñido con bola. Mediante este modelo realizan un estudio del efecto de los diferentes parámetros del proceso (avance, presión del bruñido, etc.) en las tensiones residuales y rugosidades finales obtenidas en la pieza.

Se estima la fuerza de bruñido (F) analíticamente mediante la presión a la que actúa la bomba (P) y el diámetro de la bola (d) mediante la expresión (4).

$$F = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot P \quad (4)$$

Según los autores del estudio, las fuerzas de bruñido reales son aproximadamente un 11 % menores que las calculadas con la expresión 4 debido a pequeñas pérdidas de presión entre el juego de la bola y el soporte. Este porcentaje de pérdida de presión se ha tenido en cuenta en el modelo MEF mediante la expresión (5).

$$F = 0,89 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot P \quad (5)$$

La fuerza calculada en (4), es la fuerza que ejerce una esfera sobre una superficie plana totalmente lisa y continua, no la que ejerce una esfera sobre las irregularidades o crestas de una superficie plana. Esta aproximación podría ser causa de un error en los valores de las fuerzas necesarias para el bruñido. Sobre todo no son valores reales

si se pretende analizar precisamente cuales son los valores de fuerzas necesarios para deformar los picos de una superficie rugosa.

Por otra parte, realmente el resultado final de la fuerza ejercida en la herramienta de bruñir, es el resultado de la presión hidráulica que ejerce la bomba sobre la bola y su interacción con la fuerza que ejerce el muelle sobre el que está montada la bola, independientemente de las pérdidas hidráulicas que puedan haber en el sistema. Esto quiere decir que el 11% de pérdidas no tiene que ver solo con el juego entre la bola y el soporte, sino también con otras fuerzas que interactúan en el sistema.

El modelo matemático desarrollado (figura 2.13), se considera adecuado para el análisis del proceso de bruñido con bola, solo que los valores de fuerza tomados tienen el inconveniente anteriormente planteado.

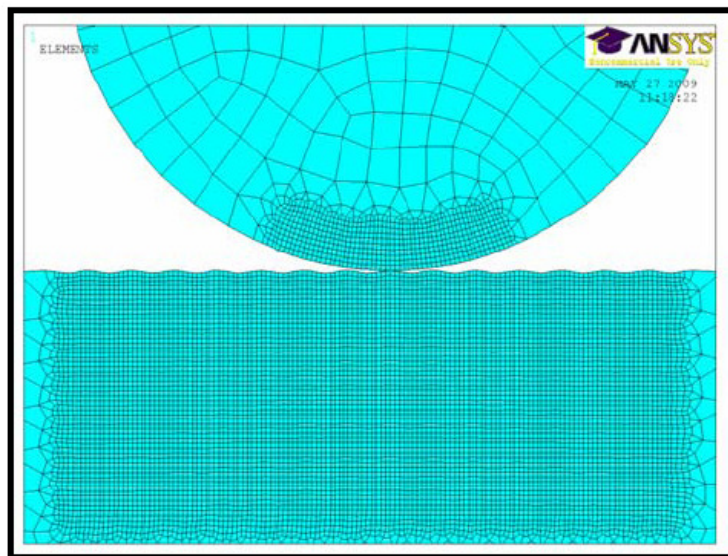


Figura 2.13. Imagen del modelo 2D del proceso de bruñido desarrollado por (Ainoha Celaya et al, 2009)

2.3.1. Principales aspectos comunes descritos en los trabajos analizados

En todos los trabajos analizados anteriormente hay una serie de aspectos que son comunes. Entre ellos podemos destacar:

1. La mayoría de las investigaciones, como se puede observar, se han centrado en la realización de estudios experimentales.
2. Se demuestra que la rugosidad superficial mejora considerablemente en las piezas después de ser bruñidas.
3. Se constata que hay un aumento de la dureza superficial producto del proceso de bruñido.

4. Las tensiones residuales pasan a ser de tipo compresivas, lo cual contribuye a aumentar la vida útil a fatiga de las piezas bruñidas.
5. Los valores de los parámetros utilizados en el proceso influyen sobre los resultados que deja el mismo en las piezas trabajadas. Por ejemplo para mayores valores de fuerza de bruñido, la rugosidad superficial que se obtiene es menor. También, para superficies que después del mecanizado previo eran más rugosas, después de ser bruñidas, tendrán valores de rugosidad más elevados respecto a superficies que después del mecanizado tenían una mejor rugosidad superficial.

2.3.2. Principales diferencias encontradas entre los trabajos analizados

En cuanto a las discrepancias entre los diferentes investigadores se puede señalar lo siguiente:

1. En el proceso de bruñido, la bola no gira sobre si misma sino que permanece fija, según (Fang-Jung Shiou & Chien-Hua Chen, 2003), por el contrario otros investigadores como (Yen, Y. C. & ALTAN, T., 2005), dicen que la bola está girando constantemente sobre si misma.
2. Los autores (Adel Mahmood Hassan & Sulieman Z.S. Al-Dhi, 1999), dicen que no existe una fuerza óptima para el proceso de bruñido con bola, que de los mejores resultados de rugosidad. Sin embargo en otros casos, como por ejemplo (Fang-Jung Shiou & Chien-Hua Chen, 2003); se dice que si existe una fuerza óptima para la cual se obtienen los mejores resultados en el proceso de bruñido.
3. (Liu Luca, 2002) plantea que la fuerzas se mantienen constantes durante todo el proceso de bruñido, sin embrago (Fang-Jung Shiou & Chien-Hua Chen, 2003) apuntan que las fuerzas son variables.
4. Los porcentajes en los que mejoran tanto la dureza superficial como la rugosidad de las piezas, no son los mismos en los diferentes trabajos analizados. Para la rugosidad superficial por ejemplo, están entre un 40% y un 90% de mejoría según (Fang-Jung Shiou & Chien-Hua Chen, 2003) y entre un 35% y un 40 % según (N.S.M. El-Tayeb et al, 2007).

2.3.3. Conclusiones sobre los aspectos comunes y las diferencias encontradas entre los trabajos analizados

Analizando los resultados de la revisión del estado del arte se puede concluir que existe aún la necesidad de investigar sobre la base de la creación de otros modelos fidedignos que aporten fundamentalmente la comprensión del proceso físico en sí y permitan optimizar el mismo. Esto también ayudaría a poder generalizar mejor los resultados del proceso en función de sus variables independientes, puesto que como se puede ver hay algunas diferencias entre los resultados obtenidos por los diferentes investigadores a partir de sus experimentos. Por otro lado, también sería necesario trabajar sobre superficies con un cierto nivel de complejidad y no tan simples como las utilizadas en las investigaciones analizadas.

Como novedades, en primer lugar, en esta tesis se desarrolla un modelo físico que describe lo que sucede durante el proceso de bruñido con bola, partiendo de un punto de vista teórico. Este modelo es validado con resultados experimentales para diferentes materiales.

En segundo lugar se realiza el proceso de bruñido sobre superficies cóncavas y convexas para comprobar los efectos positivos de dicho proceso sobre este tipo de superficies.

Capítulo 3. Descripción del proceso en estudio y de las características de la herramienta desarrollada

En este trabajo, como se ha explicado en apartados anteriores, se estudia el proceso de deformación plástica que conlleva al aplastamiento de las crestas de las irregularidades superficiales del material de una pieza mecanizada. Este proceso que lleva por nombre Bruñido con Bola, trae consigo una mejoría en las características superficiales de la pieza.

3.1. Proceso de Bruñido

Se define entonces el proceso de Bruñido, como una operación tecnológica que consiste en deformar plásticamente las irregularidades de una superficie para mejorar el acabado superficial, por la acción de la fuerza ejercida por un cilindro o una bola. Puede ser utilizado para mejorar el acabado superficial en superficies cilíndricas, superficies frontales planas, superficies de forma o perfiladas, superficies cónicas, biseles, respaldos, cambios de sección y radios, entre otras; que han sido previamente mecanizadas.

Cuando se realiza una operación de mecanizado por arranque de virutas, en ocasiones se obtienen valores de rugosidad superficial que no son los adecuados para las prestaciones que debe tener la pieza de trabajo. En algunas superficies con características especiales, como podrían ser moldes de inyección, matrices de conformación o piezas que deban tener un ajuste muy fino como es el caso de algún componente de un sistema hidráulico; se necesitan rugosidades superficiales muy bajas. Estas superficies suelen ser geométricamente complejas, con lo cual un proceso de rectificado convencional, no se puede utilizar para dar un buen acabado a las mismas. En este caso un proceso de bruñido, utilizando una herramienta con la punta acabada en una esfera de un diámetro pequeño, podría ser la solución.

Trabajar en la mejora superficial mediante la deformación plástica de las irregularidades de las superficies es una metodología peculiar. En la figura 3.1 se puede observar un esquema gráfico simplificado del proceso.

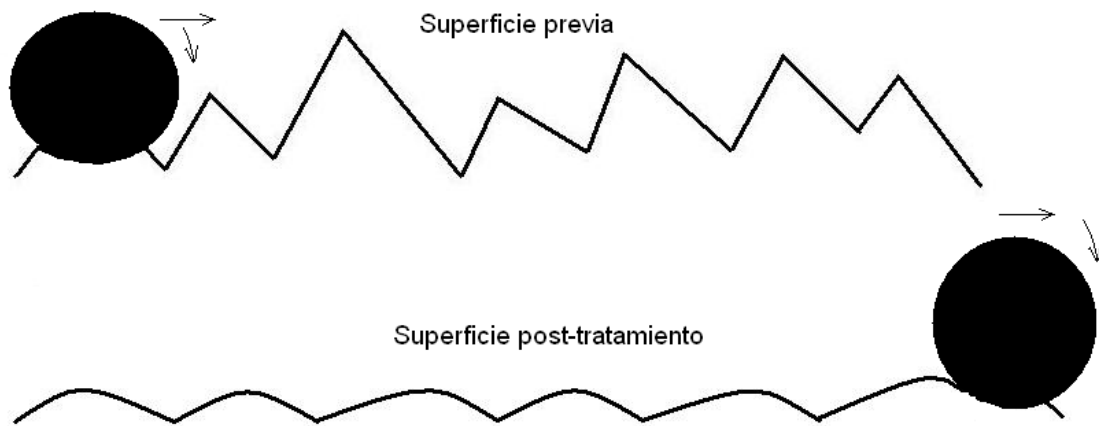


Figura 3.1. Esquema representativo del proceso de deformación plástica de las crestas de las irregularidades de una superficie mecanizada.

En la figura 3.1 se pueden ver dos representaciones. En la parte superior se encuentra el perfil obtenido después de un proceso de mecanizado por arranque de viruta convencional, en el cual las plaquitas o filos de la herramienta de trabajo siempre dejan unas crestas correspondientes a la rugosidad del acabado superficial. En la representación inferior se puede ver el resultado que se obtiene después de aplicar el proceso de deformación plástica de las crestas, el cual mejora la rugosidad mediante el paso de la esfera de la herramienta por encima de las crestas de la superficie.

Es fácil intuir rápidamente que esta herramienta lo que realiza es el desplazamiento y deformación de las crestas superficiales, recolocando el material de las mismas y obteniendo una superficie más suave y homogénea.

El querer trabajar siempre en la zona de deformación plástica, implica que se debe conocer muy bien las características del material sobre el que se va a trabajar y el acabado superficial que se quiere obtener en la pieza. Estas características van a influir directamente sobre los parámetros que se aplicaran a la herramienta de bruñir, como son la presión o profundidad a la que penetre la bola, la velocidad de avance, el paso lateral o la estrategia de mecanizado a utilizar.

Durante y posteriormente a la aplicación del proceso con la herramienta se deben de tener en cuenta las consecuencias del mismo. La deformación permanente en frío provoca dos problemas. El primero es la posible modificación geométrica de la pieza, provocada por la disminución de la altura de las crestas que origina el mecanizado con

arranque de virutas previo. Esta consecuencia, en la mayoría de los casos será despreciable, debido a que la modificación geométrica sería en el peor de los casos de pocas micras. El otro posible problema a tener en cuenta es la acritud generada debida a la deformación en frío del material, como resultado producirá un endurecimiento superficial de la pieza tratada. Esta consecuencia también se debe tener en cuenta en la estrategia de mecanizado, debido a que si se realizan múltiples pasadas por una misma superficie, las condiciones de trabajo probablemente varíen.

3.2. Ventajas e inconvenientes de este tipo de procesos

En general los procesos que con más frecuencia se utilizan para mejorar la calidad de las superficies de las piezas mecanizadas como son el lapeado o el rectificado, son procesos muy extendidos en el mundo de las empresas dedicadas al mecanizado de piezas, de manera que se conocen sus características con cierta profundidad. En este caso, la herramienta que se diseña es un prototipo, por lo que requiere de una fase de pruebas en distintas situaciones y de un análisis de su comportamiento. Esto es lógico al tratarse de un proceso del cual no hay demasiadas referencias en el mundo de las empresas de fabricación.

No obstante la mayoría de los procesos utilizados para mejorar la calidad superficial, convergen en una limitación común, no son efectivos en el acabado de piezas con superficies curvas, que no sean planas, cilíndricas o cónicas, o en piezas con cavidades muy estrechas. En muchos de estos casos normalmente se procede a realizar un pulido manual con productos abrasivos. Es precisamente esta limitación la que hace que tenga razón de ser el proceso realizado con la herramienta que se ha diseñado. La misma es capaz de trabajar montada en el cabezal de cualquier máquina de 3 o más ejes, guiada por un programa de CNC o no, para mejorar la calidad superficial de superficies tan complejas como las que sean capaces de elaborarse en la propia máquina.

El proceso de bruñido aporta ventajas interesantes, como por ejemplo:

1. Se obtienen muy buenos acabados superficiales.
2. Elimina o reemplaza operaciones de acabado posteriores para las cuales son necesarias máquinas herramientas diferentes de la que estaba siendo utilizada para mecanizar la pieza.
3. Los costes de operación son relativamente bajos.
4. No se requiere de operarios especializados para efectuar esta operación.

5. Minimiza las marcas o huellas dejadas por la herramienta del mecanizado previo.
6. Provoca un endurecimiento superficial en el material trabajado. Este se produce por la reorganización de los granos del material producto del proceso de deformación, durante el cual los mismos se condensan y afinan.
7. Se obtienen superficies muy precisas. Se pueden obtener tolerancias muy estrechas con medidas exactas. Sin embargo no hay cambios en las cotas nominales, con lo cual no afecta las medidas de la pieza.
8. Mejora las propiedades físicas y mecánicas de la superficie, logrando aumentar la vida útil de la pieza. Por un lado, aumenta la resistencia al desgaste porque al bruñirse la superficie casi se igualan el tamaño de las crestas y los valles de la topografía, provocando que dicha superficie, al entrar en contacto con otra, sufra un desgaste mínimo. Aumenta también la resistencia a la fatiga por la aparición de altas tensiones residuales compresivas que quedan en la capa superficial del material de la pieza, producto del proceso de bruñido. Para que un esfuerzo externo provoque un daño sobre la pieza, éste debe sobrepasar en valor a esos valores de tensiones residuales. Por otro lado también aumenta la resistencia a la corrosión porque al reducirse la porosidad y las marcas de la herramienta, las sustancias reactivas o contaminantes tienen menos posibilidad de atacar y corroer la superficie bruñida.
9. Puede corregir los defectos que puedan haber aparecido en operaciones previas de mecanizado tales como conicidad, planicidad, falta de circularidad y otros.
10. Las diferentes piezas de esta herramienta son intercambiables, por lo que resulta sencillo, fácil y rápido el mantenimiento y el cambio de piezas gastadas o deterioradas tales como las esferas, el casquillo empujador, etc., lo que ayuda a prolongar la vida útil de la herramienta.
11. El proceso es relativamente rápido comparado con otros similares de acabado antes mencionados que tardan más, con lo cual se ahorra tiempo y aumenta la productividad.
12. El empleo del propio fluido de corte de la máquina, hace que la zona de trabajo esté lubricada lo cual disminuye la fricción y refrigera el proceso y por ende el calor generado no provoca los conocidos efectos negativos, que dejan en el material defectos térmicos.
13. Es un proceso ecológico, pues no se generan desperdicios sólidos al no haber arranque de virutas. Tampoco produce altos niveles de ruido.

14. Puede realizarse en máquinas herramientas convencionales, fundamentalmente en tornos y fresadoras, así como en máquinas herramienta con control numérico. La precisión del proceso es una función del diseño de la herramienta y de las condiciones de operación de ésta y no de la precisión de la máquina herramienta.
15. Por el buen acabado que ofrece se emplea en ocasiones como paso previo en los procesos de recubrimientos metálicos superficiales como son cromados, niquelados, entre otros.

Aunque la herramienta fabricada sea particularmente novedosa, actualmente existen varias referencias similares en el mercado.

3.3. Prototipos de herramienta de bruñido similares

Hoy en día existen herramientas similares que realizan procesos de bruñido por deformación plástica como el que realiza esta herramienta, aunque la mayoría de ellas están enfocadas a dar acabado en piezas en revolución, de manera que casi todas estas herramientas son usadas en tornos. A continuación se muestran algunos ejemplos de herramientas de bruñir.

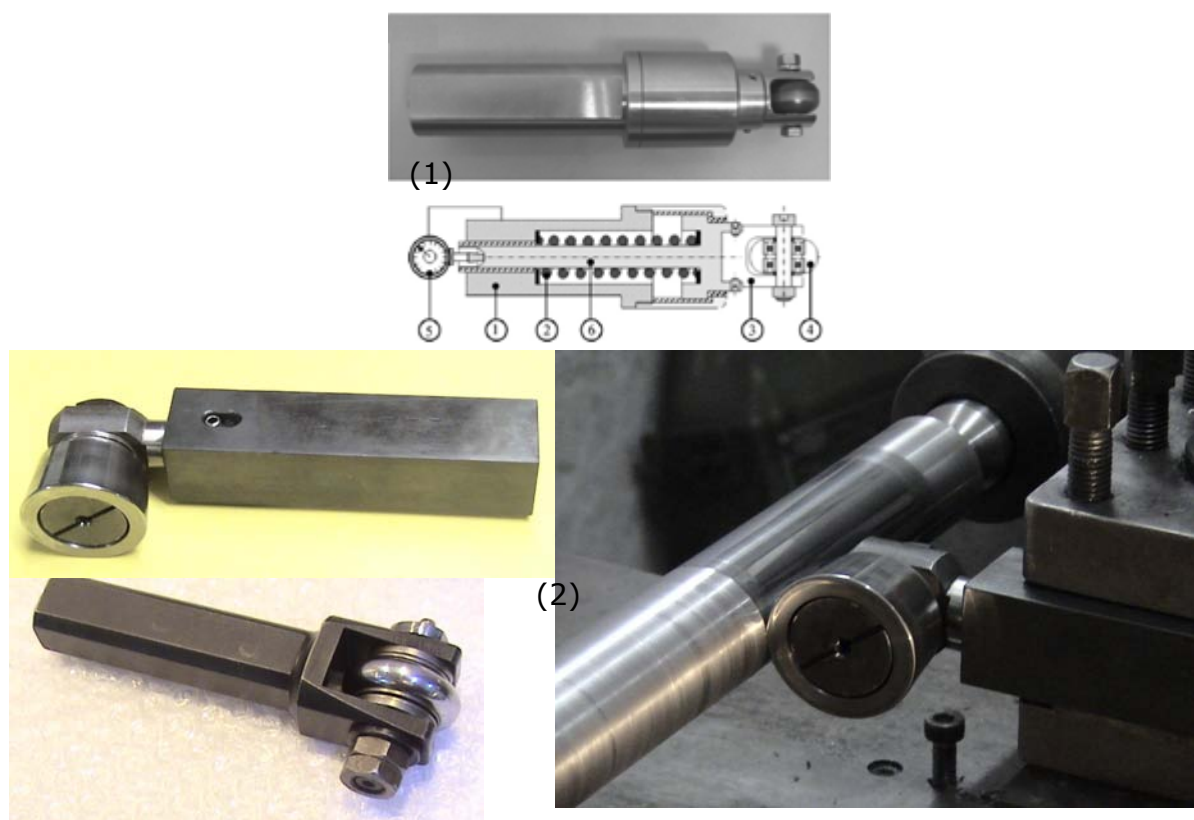


Figura 3.2. Herramientas para bruñir con rodillo utilizada en operaciones de torno. (1)- N.S.M. El-Tayeb et al., 2007. (2)- Comercializada por Mech-India ENGINEERS PVT. LTD., <http://www.mechindia.com/>)

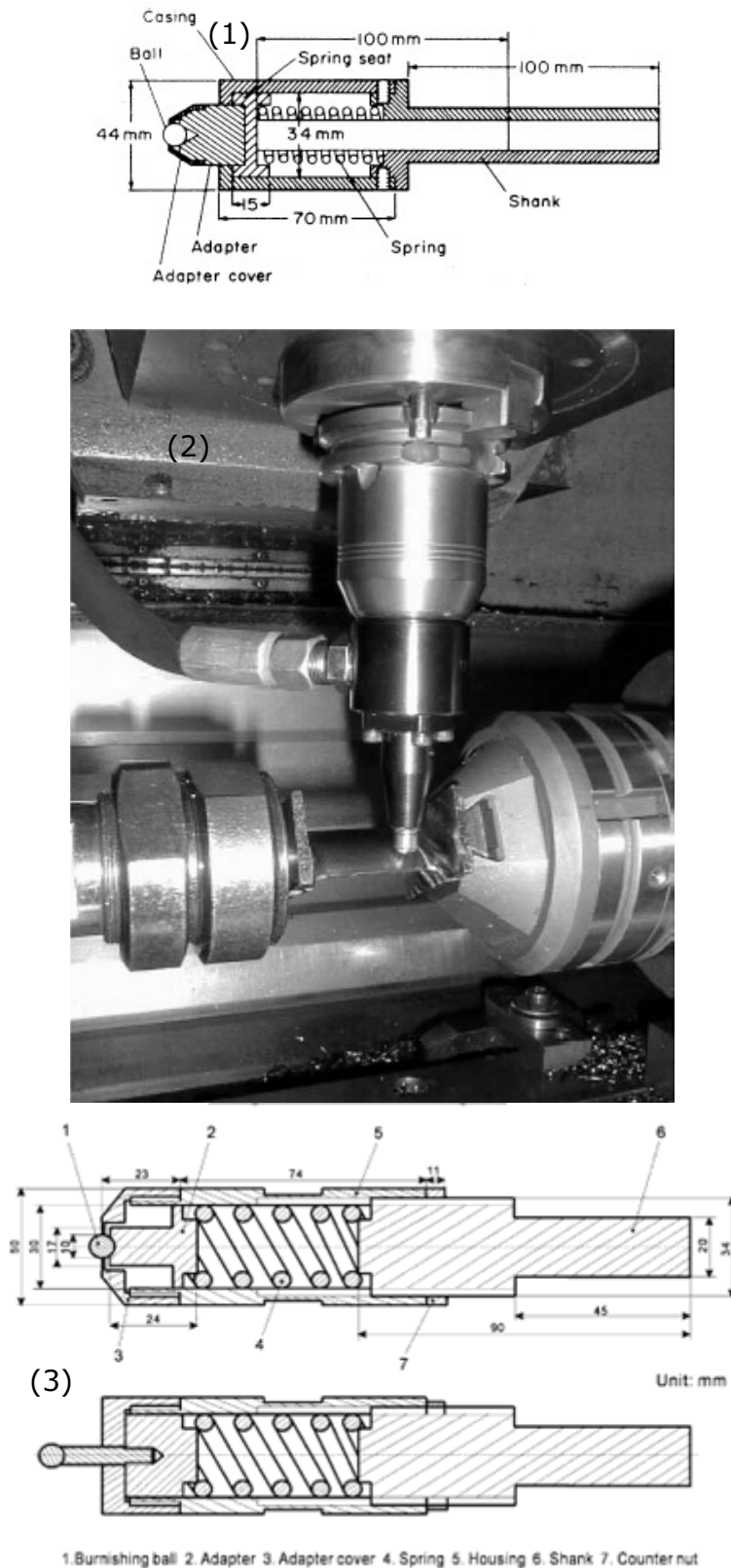


Figura 3.3. Herramienta para bruñir con bola utilizada en torno. (1)- A.M. Hassan et al, 1998. (2)- Comercializada por Ecoroll AG Werkzeugtechnik, www.ecorll.de. (3)- F.-J. Shiou et al., 2003

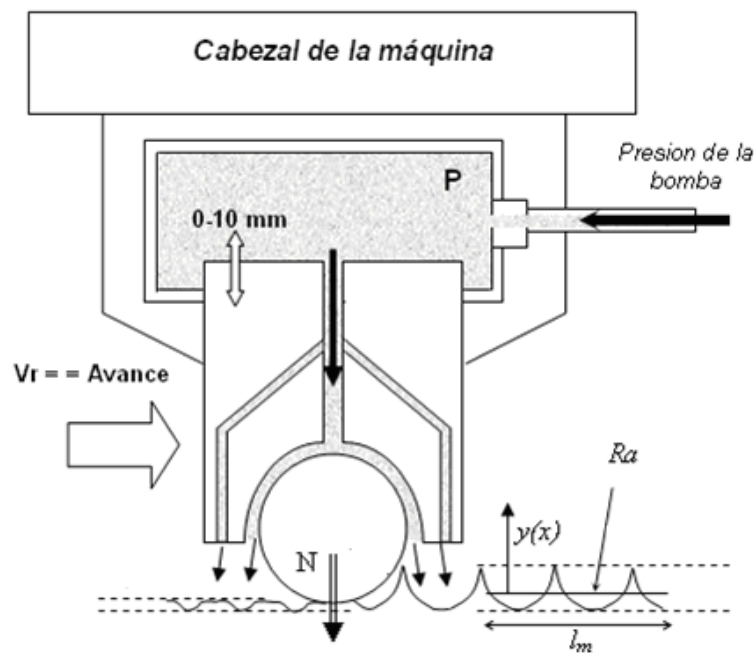


Figura 3.4. Herramienta para bruñir con bola utilizada para piezas planas (N. López de la Calle et al., 2005)

Si se analizan los diseños de las figuras 3.2 y 3.3, se puede ver que estas herramientas basan su funcionamiento en la fuerza que realiza un muelle tarado a una fuerza deseada. La utilización del muelle como fuente de presión tiene la ventaja de que simplifica de manera considerable el sistema y el diseño, lleva poco mantenimiento y requiere una instalación muy sencilla, con lo que se reducen los costes del prototipo considerablemente. Por el contrario, este sistema de muelle también tiene algunos inconvenientes como podrían ser los ajustes manuales que se deben realizar para calibrar la presión. Posiblemente se deba parar la máquina para montar algún instrumento tipo dinamómetro, para la calibración de la fuerza que ejerce el muelle.

Las herramientas de la figura 3.3, son exclusivas para torno, por su constitución y porque en vez de utilizar una bola en la punta montan una especie de rodillo con pasador, lo que limita las direcciones de trabajo. En el caso de utilizar una bola como las de la figura 3.4, se permite el trabajo en los ejes X e Y de la máquina, con lo cual podrían adaptarse a otra máquina que no sea un torno.

En la herramienta de la figura 3.4 se puede ver un prototipo, pensado para utilizar en una fresadora como la herramienta diseñada en esta tesis y con un sistema de control

de presión mediante un circuito hidráulico. El sistema hidráulico permite una regulación exterior rápida y sin desmontar nada. Por otro lado trabajar con la presión generada por un fluido permite que se puedan conseguirse presiones de trabajo muy elevadas, las cuales son útiles para deformar materiales muy duros o con tratamientos, que con la fuerza de un muelle sería inviable probablemente.

Parece ser que en esta herramienta (figura 3.4), se controla la presión de la bola a través de una película de fluido que actúa como cojín de lubricación y transmisor de la fuerza hidráulica. Diseñar la cavidad de la bola para que tenga un cojín de fluido uniforme y constante, sea cual sea la dirección de trabajo de ésta, es difícil de lograr y hacerlo; puede resultar un inconveniente por la falta de estanqueidad que trae consigo unas pérdidas excesivas de presión en el circuito hidráulico de la herramienta. Por otra parte este fluido que sale al exterior, podría contribuir a lubricar y refrigerar la pieza de trabajo durante la operación de bruñido y esto puede ser muy bueno.

Después de analizar todos estos ejemplos, se ha diseñado una herramienta con un sistema híbrido entre todos ellos, intentando coger los aspectos positivos de cada uno. De esta manera se ha fabricado una herramienta que aparentemente parece solucionar los inconvenientes anteriormente mencionados. Se utiliza un taqué hidráulico, con el fin de tener un elemento que en su entrada sea gobernado por la fuerza hidráulica de un fluido, en este caso el propio fluido de corte de la máquina-herramienta y que esta fuerza hidráulica se convierta en una fuerza de empuje sobre la bola de la herramienta (figura 3.5).

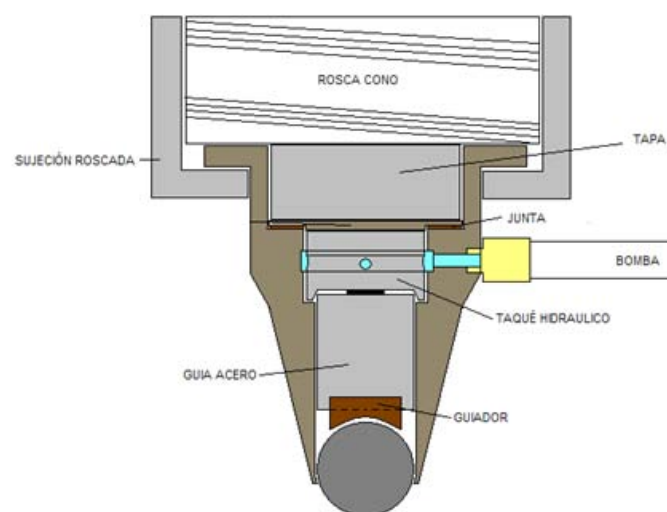


Figura 3.5. Esquema de la herramienta diseñada

3.4. Descripción de los elementos mecánicos que componen la herramienta

La herramienta está formada por un cuerpo principal con distintas piezas interiores y una serie de elementos acoplados en su exterior que son los encargados de alimentar el circuito hidráulico de la herramienta.

El cuerpo principal de la herramienta contiene en su interior: una bola metálica, un casquillo de fricción, un vástago o guiador, un taqué hidráulico, 2 juntas tóricas y una tapa. (figura 3.6)

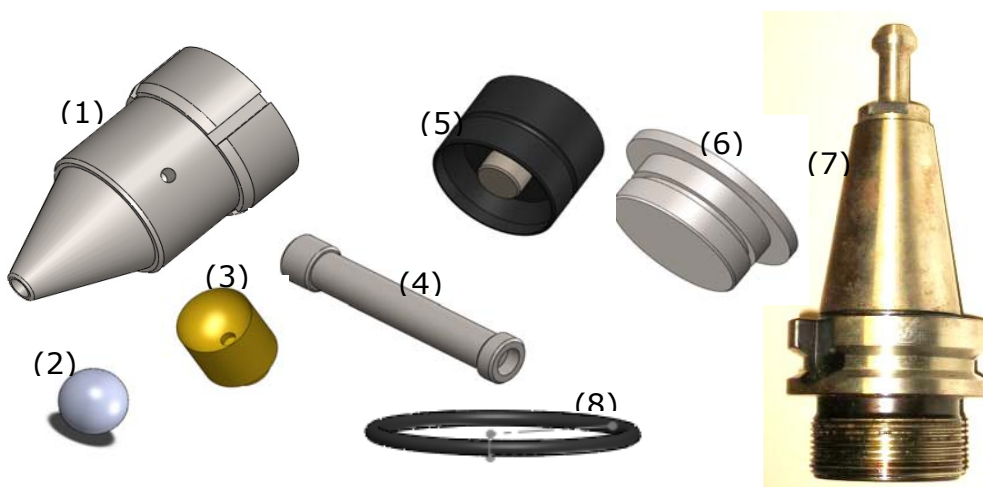


Figura 3.6. (1) Cuerpo principal de la herramienta, (2) Bola de diámetro 10mm, (3) Casquillo de fricción, (4) Vástago o guiador, (5) Taqué hidráulico, (6) Tapa superior del cuerpo, (7) Cono BT-40 utilizado para el acoplamiento a la máquina, (8) Junta tórica.

3.4.1. Cuerpo principal de la herramienta

Para diseñar el cuerpo de la herramienta (figura 3.6-1), se ha tenido en cuenta como principal premisa la intercambiabilidad con otras máquinas distintas a las que se han realizado las pruebas con el prototipo. Por esta razón, se ha decidido montar el cuerpo de la herramienta sobre un soporte de unión tipo cono BT-40 que es estándar para la muchas de las fresadoras CNC existentes en el mercado. Utilizando un soporte estándar se reducen los costes de fabricación a la vez que se facilita su posible implantación en el mercado.

Dentro de los conos tipo BT-40 que existen (figura 3.6-7), el que cumple mejor los requisitos para un buen acoplamiento al cuerpo de la herramienta a diseñar es el tipo porta-pinzas de cuarenta milímetros de diámetro, el cual, una vez extraída la pinza interior y la tuerca de apriete de la pinza, deja una rosca de gran diámetro a la que se le rosca el cuerpo de la herramienta diseñada.

El cuerpo es el encargado de sostener todos los elementos que conforman la herramienta en su interior. En la figura 3.7 se puede observar donde va montado cada uno de los elementos dentro del cuerpo.

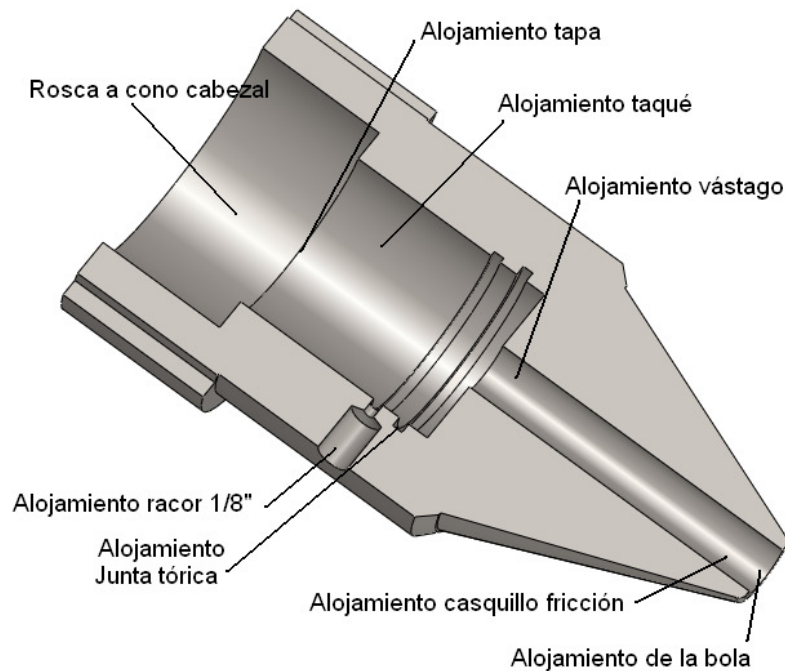


Figura 3.7. Sección del cuerpo de la herramienta

Para la fabricación del cuerpo se ha escogido un acero inoxidable, concretamente un M333 ISOPLAST de la casa Böheler. Se ha seleccionado este acero debido principalmente a tres razones, la propiedad inoxidable, la buena mecanización y su resistencia. Este acero de Böheler es el equivalente al AISI 420 de fácil mecanización, es un acero muy utilizado para la fabricación de moldes de inyección de plástico por sus buenas propiedades. A continuación en la tabla 4.1, se puede encontrar la composición química del mismo.

Composición química (%)				
C	Si	Mn	Cr	Otros
0,28	0,3	0,3	13,5	+N

Tabla 3. 1. Composición química del acero para el cuerpo

3.4.2. Bola bruñidora

Este prototipo de herramienta se ha fabricado con una bola de 10 mm de diámetro, (figura 3.6-2) debido a que se han estudiado varios de los sistemas existentes en el

mercado y se ha visto que es un tamaño estándar en muchas de ellas. Se han escogido bolas de acero al cromo endurecido de aproximadamente 57-66 HRC.

3.4.3. Casquillo de fricción

Una de las piezas que está sometida a más esfuerzo y desgaste es el elemento que se ha denominado “casquillo de fricción” (figura 3.6-3). Este casquillo está sometido básicamente a dos esfuerzos, uno es el efecto de compresión procedente del taqué y el vástago o guiador, el otro es la fuerza de fricción provocada por la rodadura contra la bola de la herramienta.

Se ha escogido un acero común de buena mecanización, el acero DIN 2344, este acero no tiene una elevada dureza, de manera que después del mecanizado del casquillo se ha templado y revenido hasta obtener una dureza de 52 HRC. Posteriormente se le ha realizado un recubrimiento superficial de PVD (*Physical Vapour Deposition*) con el objetivo de aumentar aún más la dureza superficial y disminuir el coeficiente de fricción de la superficie que debe estar en contacto con la bola.

Este tratamiento se basa en la deposición de un material vaporizado mediante un chorro de plasma y su aplicación sobre las superficies mediante un proceso electrolítico de la pieza colocada en una cámara al vacío. Controlando la presión, temperatura, tiempo de exposición y material a fundir, se dan las características a la capa del recubrimiento. Este material que se deposita sobre las superficies de la pieza a tratar está compuesto de Nitruro de Titanio (TiN), Nitruro de Titanio y Aluminio (TiAlN), Nitruro de Aluminio y Cromo (TiCrN) y Grafito (C).

En este caso se ha utilizado un tratamiento bi-capa formado por un BALINIT LUMENA + BALINIT C. La ventaja de realizar un doble tratamiento está en que el recubrimiento inicial es el que deja unas propiedades resistentes elevadas, mientras que el segundo aporta un coeficiente de fricción muy bajo. Se consigue porque una vez que la pieza está en uso, la capa tratada con el segundo tratamiento sufre un desgaste prematuro quedando solo restos de grafito sobre la capa inicial; el cual realiza la función de cojín lubricante de la primera capa. Este efecto es el que hace que se mejore destacadamente el coeficiente de fricción. Las características de ambos tratamientos se pueden observar en la tabla 3.2.

	BALINIT LUMENA	BALINIT C
Material del recubrimiento	TiAlN	WC/C
Microdureza (HV 0,05)	3.400	1.000
Coeficiente de fricción contra el acero (seco)	0,4	0,2
Espesor del recubrimiento (μm)	8-10	1-4
Temperatura máxima de trabajo ($^{\circ}\text{C}$)	900	300
Color del recubrimiento	Gris-azul	negro

Tabla 3. 2. Características de los diferentes tratamientos de PVD utilizados

3.4.4. Vástago empujador o guiador

El vástago es el elemento de transmisión de la fuerza y el movimiento desde el taqué hasta el casquillo de fricción y la bola (figura 3.6-4). Esta pieza se encuentra alojada dentro de un agujero pasante realizado en el cuerpo de la herramienta. Ha sido fabricado en acero F-1140 (según norma UNE).

Debido a que se desea que el casquillo sea un postizo para posibles mantenimientos y al mismo tiempo se busca un buen acoplamiento entre vástago y casquillo, se ha optado por realizar una unión tipo macho-hembra en la cual el vástago es la parte hembra. Este acoplamiento tan básico asegura la buena unión entre las dos piezas a la vez que permite una sustitución sin útiles especiales. Se ha dejado un ajuste entre las dos piezas con un juego apreciable con el fin de asegurar un buen acoplamiento cuando todas las piezas se encuentran alojadas dentro del agujero.

Lo último a destacar sería que las paredes del diámetro exterior mayor, el cual hace contacto con el cuerpo de la herramienta, así como la superficie plana superior que hace contacto con el embolo del taqué, requieren un proceso de rectificado, con el fin de mejorar el acabado superficial y disminuir el coeficiente de fricción.

3.4.5. Taqué hidráulico

La incorporación de un taqué hidráulico procedente de un motor de cuatro tiempos de un turismo es la clave para convertir la fuerza hidráulica que ejerce el fluido, en un

desplazamiento sin necesidad de tener que fabricar ninguna pieza. El principio de un taqué hidráulico es el mismo que el de un pistón hidráulico de simple efecto pero con la carrera muy corta. El taqué (figura 3.8) tiene un pequeño émbolo que al insertarle una presión dentro de la cámara del cuerpo, sale hacia fuera hasta hacer tope de extensión de carrera. Gracias a ello se ha realizado el vástago visto anteriormente a medida, de manera que el embolo del taqué, al salir expulsado, empuje al vástago y transmita la fuerza al casquillo de fricción y a la bola.

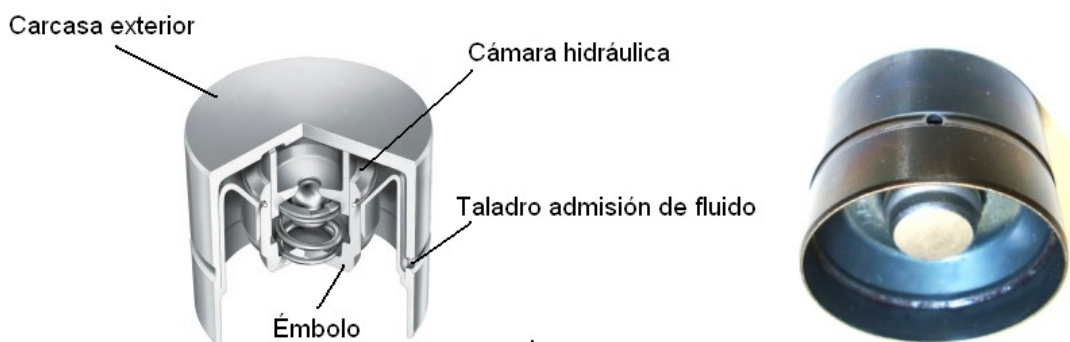


Figura 3.8. Sección del taqué hidráulico

Para que el taqué hidráulico reciba la presión del fluido, se ha realizado un taladro en el cuerpo de la herramienta donde va colocado el racor de alimentación del sistema. En el interior del cuerpo de la herramienta se ha mecanizado una ranura que coincide con la que lleva el taqué y al mismo tiempo coincide con el taladro del racor de alimentación. Para asegurar una buena estanqueidad de este sistema entre el taqué y su alojamiento, se han realizado un ajuste deslizante ($h7/G6$), con muy poco juego, de manera que en algunos casos es necesaria la ayuda de algún útil para sacar el taqué con facilidad del cuerpo de la herramienta, debido también a su difícil sujeción para la extracción.

3.4.6. Juntas tóricas

Para garantizar aun más la estanqueidad se han realizado dos ranuras en el cuerpo de la herramienta, una en la parte inferior del taqué y la otra en el tapón. En estas ranuras se han colocado juntas tóricas según normativa (figura 3.9). Estas tienen un diámetro de toro 2 mm y diámetro interior 35 y 31 mm respectivamente. La de 35 mm va montada en una de las ranuras mecanizadas en el cuerpo de la herramienta y realiza la estanqueidad inferior del taqué, la de 31 mm va montada en el tapón superior y realiza la estanqueidad por encima del taqué.

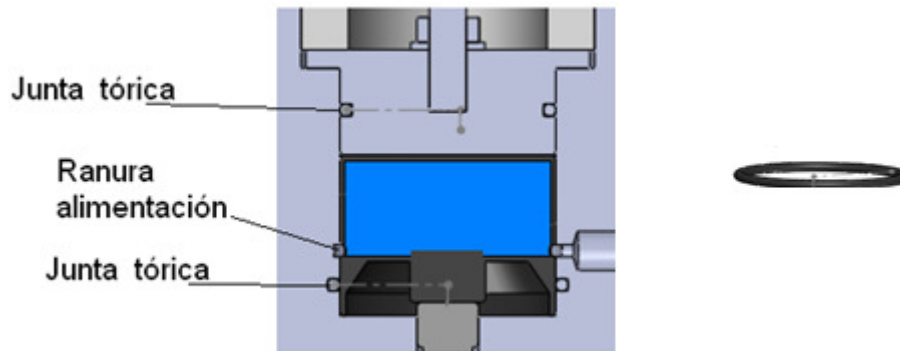


Figura 3.9. Sección del posicionamiento del taqué y las juntas

3.4.7. Tapón del conjunto

Por último el tapón (figura 3.10) se ha dimensionado de manera que sirva de tapa del conjunto, que mantenga la estanqueidad mediante la ayuda de una tórica y que tenga un mecanismo de ayuda a la extracción. Ha sido fabricado en acero F-1140 (según norma UNE).

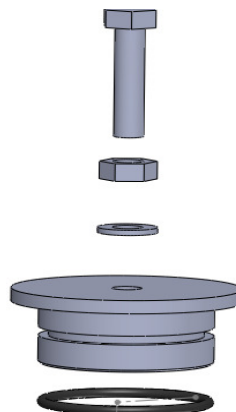


Figura 3.10. Elementos que conforman el tapón

3.5. Elementos que componen el sistema hidráulico de la herramienta

El circuito hidráulico de la herramienta (figura 3.11) está formado por los siguientes elementos:

- Fluido hidráulico
- Depósito
- Filtro
- Bomba hidráulica
- Mangueras

- Manómetro
- Válvula limitadora de presión regulable
- Racores unión (codos, tes, acoplamientos)

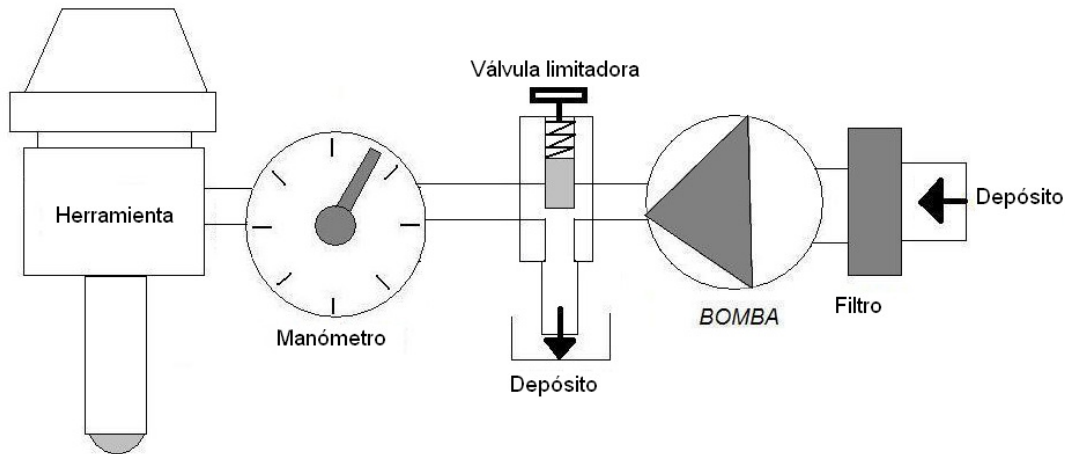


Figura 3.11. Esquema hidráulico de control de la herramienta

3.5.1. Elementos de control de la presión

Para controlar la presión que se ejerce sobre el material, es necesaria una válvula limitadora de presión (figura 3.12), encargada de evacuar todo el exceso de caudal producido por la bomba cuando ya se ha alcanzado la presión deseada en la herramienta. Durante el proceso de funcionamiento de la herramienta, la válvula está dejando escapar fluido constantemente, de manera que necesita un sistema de conducción del fluido de escape, mediante un latiguillo hacia el tanque. Estos tipos de válvulas, normalmente tienen 2 ó 3 vías entre entradas y salidas, de manera que tiene que ser montadas en serie o paralelo según su configuración. La regulación de la presión de escape se realiza exteriormente sobre el mando giratorio. Este mando giratorio incide sobre la precarga de un muelle que asimismo incide sobre el asiento de la válvula, normalmente de forma esférica o plana.



Figura 3.12. Válvula limitadora de presión mediante regulación externa (3vías)

Este sistema se ha completado con un manómetro convencional con una escala de 0 a 4 bar con esfera de 80 mm (figura 3.13).



Figura 3.13. Manómetro convencional utilizado 0-4 bar

3.5.2. Funcionamiento del sistema hidráulico

La bomba, que es la de la propia máquina-herramienta, hace circular fluido de corte a través del sistema, de donde lo toma la herramienta a través de una manguera flexible. El control de la presión hidráulica se realiza a través de la válvula de control externa colocada antes de la herramienta, la cual regula la presión que se realiza sobre la bola y consecuentemente sobre la superficie a trabajar. Se solventan los problemas de estanqueidad en la punta debido a la utilización del casquillo de fricción que actúa como cojinete contra la bola. Por último también se minimizan las pérdidas de carga producidas por el paso del fluido a través de la herramienta, debido a que el cuerpo trabaja con el fluido en régimen estacionario.

De esta manera queda perfectamente ensamblada y lista para realizar su función (figura 3.14).



Figura 3.14. Imagen del prototipo fabricado

Capítulo 4. Modelo físico para estudiar la mejora de la rugosidad superficial de una pieza al ser bruñida

La distribución de presión en la superficie de una pieza durante un proceso de deformación producto de la acción de una fuerza de compresión, no es uniforme (X.L. Hu *et al.*, 2004). En general son varios los factores que influyen sobre esta presión, como son: las propiedades del material, la geometría a deformar y el fenómeno de auto-endurecimiento que ocurre en el propio material de la pieza. Este último es principalmente función de la tasa de velocidad de deformación. En el caso de las aleaciones de aluminio el auto endurecimiento es un factor importante a considerar (Hosford, W.F. *et al.*, 1993).

En este capítulo se describe la obtención de un modelo físico para predecir lo que ocurre durante el proceso de bruñido con bola aplicado a una superficie para mejorar su acabado superficial. La solución final desarrollada se construye sobre un método de equilibrio de fuerzas, en un cuerpo libre infinitesimal. Este balance de fuerzas ha permitido construir una ecuación diferencial ordinaria, con las incógnitas esfuerzo normal en la dirección horizontal σ_x y presión de deformación P .

Para llegar a la solución final, se desarrolla un modelo por etapas. En cada etapa se llega a obtener una aproximación a la solución de la ecuación que predice las fuerzas de bruñido necesarias para deformar la superficie de una pieza.

Para llegar a la primera aproximación se consideran las siguientes hipótesis:

- La bola de bruñir se considera un cuerpo rígido y el material bruñido un material plástico perfecto.
- El flujo plástico corresponde a un problema de tensión plana.
- No existe rozamiento entre la bola y el material de la pieza.
- La superficie del material es continua, es decir en su topografía no existen ni valles ni picos.

En una segunda aproximación se suma a lo anterior, el efecto del autoendurecimiento que va sufriendo el material a medida que se va deformando. Esto hace que se modifique la primera hipótesis planteada, es decir se considerará el material como un plástico real, donde éste se va endureciendo a medida que se va deformando. El modelo obtenido para esta aproximación expresa la fuerza de bruñido F , como una función del diámetro de la bola de la herramienta D_B , con la Tensión umbral límite a

tracción pura, γ y de la profundidad de bruñido o salto e . Este último se define como la diferencia de alturas de la topografía que hay en la zona de transición de la parte fresada a la parte bruñida de la pieza. El salto es provocado por la profundidad a la que penetra la bola de la herramienta en la superficie de la pieza de trabajo (figura 4.1). Al final se expresa el efecto de autoendurecimiento como función de la intensidad de la tasa de la velocidad de deformación del material H .

A continuación se describirán las dos aproximaciones a la solución del problema de bruñido comentadas anteriormente. Para encontrar estas soluciones, sería interesante analizar la geometría de la pieza en cuestión y las fuerzas y esfuerzos que propician la disminución de dicha rugosidad superficial.

4.1. Aspectos generales sobre los modelos

Antes de desarrollar cada una de las soluciones al problema planteado, se hace necesario definir dos aspectos que son comunes a todas ellas. En primer lugar la geometría de la pieza a analizar y en segundo lugar lo relacionado con las fuerzas que actúan sobre el elemento diferencial de área analizado.

4.1.1. Definición de los aspectos geométricos

Como se ha mencionado antes, se analizará en primer lugar la geometría de la pieza en cuestión en la zona donde se puede observar el cambio de la parte fresada a la bruñida (figura 4.1).

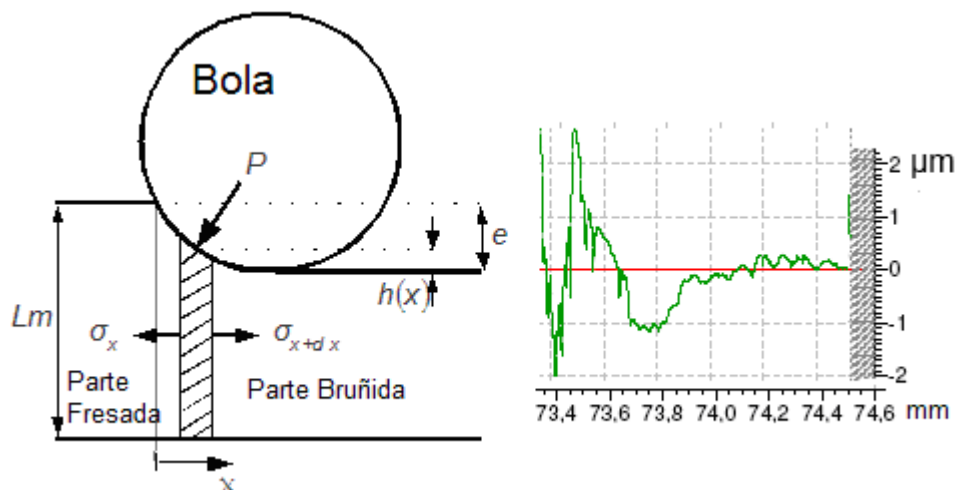


Figura 4.1. Representación esquemática y gráfico real, de la huella dejada por la bola de la herramienta a su entrada en la pieza de trabajo

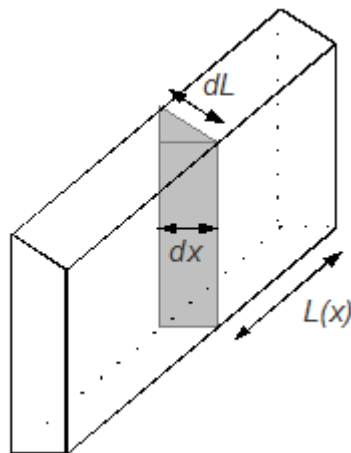
En la figura 4.1,

- L_m - Altura de la pieza de trabajo
- e - Profundidad que penetra la bola en la pieza o salto
- $h(x)$ - Altura del elemento diferencial de área respecto al perfil bruñido
- P - Presión de bruñido
- σ_x - Esfuerzos sobre el elemento diferencial de área en la dirección x
- Δx - Ancho del elemento diferencial de área

Una vez definida la geometría de la pieza, se pasará a definir las fuerzas y esfuerzos que intervienen en el proceso en estudio.

4.1.2. Fuerzas y esfuerzos que actúan sobre un elemento diferencial de área

En la figura 4.2 se muestra un elemento diferencial de área de la zona en estudio. En él se representan las diferentes fuerzas y esfuerzos que actúan durante el proceso de deformación del mismo, producto de la incidencia de la bola de la herramienta sobre el material de la pieza de trabajo.



Donde:

- $L(x)$ - Longitud de contacto bola-pieza
- dL - espesor del elemento diferencial de área
- dx - Longitud del elemento diferencial de área en el eje de las x
- dL - Espesor del elemento diferencial de área

Figura 4.2. Representación esquemática del elemento diferencial de área tomado para el estudio

En la figura 4.2, $L(x)$ ha sido considerada como una superficie plana cuya longitud es muy pequeña. En realidad, esta superficie no es plana, sino esférica, pues tiene la forma de la bola de la herramienta. Al ser tomada de esta manera, da la sensación de que la punta de la herramienta tiene forma de rodillo y no de bola, pero es una buena solución para simplificar el problema geométrico.

4.2. Primera aproximación a la solución de la ecuación representativa del modelo físico para la deformación de la superficie continua de un cuerpo

Si se hace una sumatoria de fuerzas en el eje de las x sobre un elemento diferencial de área como el de la figura 4.2, se obtiene:

$$\sum F_x = 0 : -(\sigma A)_x + (\sigma A)_{x+dx} + P \Delta x \frac{dh}{dx} = 0 \quad (1)$$

Desarrollando (1), se llega a (2)

$$\frac{d(\sigma A)}{dx} + PL_{(x)} \frac{dh_{(x)}}{dx} = 0 \quad (2)$$

Donde A es una sección normal a la tensión σ , definida por: la altura del material L_m multiplicada por la longitud de contacto de la bola-pieza $L_{(x)}$

$$A = L_m L_{(x)} \quad (3)$$

A su vez la longitud de contacto bola-pieza $L_{(x)}$, se define en función de la profundidad de bruñido e y la altura $h_{(x)}$, según figuras 4.1 y 4.2

$$L_{(x)} = \sqrt{D_B(e - h_{(x)})} \quad (4)$$

Con $h_{(x)}$ definido por:

$$h_{(x)} = \frac{(\sqrt{D_B e} - x)^2}{D_B} \quad (5)$$

Adimensionalizando las ecuaciones (2-5), utilizando para ello las ecuaciones (9), (10) y (11):

$$x^* = \frac{x}{\sqrt{D_B e}}, \quad \sigma^* = \frac{\sigma}{\gamma}, \quad P^* = \frac{P}{\gamma} \quad (9), (10), (11)$$

Donde γ es la tensión umbral límite a tracción pura del material.

Remplazando las ecuaciones (3, 4, 5 y 6) en la ecuación diferencial (2), se tiene la ecuación de fuerzas adimensional, asociada al problema de fuerzas en el bruñido con bola (12).

$$\frac{d\sigma^*}{dx^*} + (1-x^*) \left[\frac{\sigma^*}{(2x^* - x^{*2})} - P^* 2 \frac{e}{L_m} \right] = 0 \quad (12)$$

Como ya se había mencionado en epígrafes anteriores, la primera aproximación o primer modelo desarrollado, trata el problema de fuerzas de bruñido como un problema de deformación de un plástico perfecto. El comportamiento plástico del material es introducido mediante el criterio de plasticidad de von Mises, que en forma adimensional es:

$$\sigma^* + P^* = \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

Por lo tanto, las componentes de la tensión involucradas en el problema de fuerzas σ^* y P^* , ecuación (12), deben satisfacer el criterio de plasticidad expresión (13). Despejando la presión P^* de la expresión (13) y remplazándola en (12), se obtiene la siguiente ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{d\sigma^*}{dx^*} + (1-x^*) \sigma^* \left[\frac{1}{2x^* - x^{*2}} + 2 \frac{e}{L_m} \right] = (1-x^*) 2 \frac{e}{\sqrt{3} L_m} \quad (14)$$

En (14), la tensión σ^* es sólo función del espacio x^* , con dominio comprendido entre [0 y 1]. Por último, el modelo queda completamente definido si se introduce la condición inicial del problema de tensiones:

$$\sigma^*(x^*=0) = 0 \quad (15)$$

El modelo desarrollado, ecuaciones (14, 15), esta asociado a un problema de flujo plástico desacoplado, en el cual no interviene de momento el problema de tasa de velocidades de deformación, en la determinación de las tensiones.

La solución de la ecuación (14) con la condición inicial (15) permite encontrar la distribución de tensiones del material, bajo la bola de bruñido, cuando se está produciendo la deformación plástica.

Una solución numérica, realizada con el método de las diferencias finitas, es aplicada a la ecuación (14) con condición inicial (15). Una vez obtenida la distribución de tensión σ^*_i , asociada a un dominio discreto, se obtiene la distribución de presión discreta P^*_i , por medio de la función (13).

En general la presión adimensional P^* simulada para diferentes condiciones del modelo, es siempre constante e igual a $\frac{2}{\sqrt{3}}$. Las condiciones de las que se hace mención pertenecen al intervalo siguiente:

$$0,00002 \leq \frac{e}{L_m} \leq 0,001 \quad (16)$$

Una vez determinada la presión P^* , se puede estimar la fuerza de bruñido en la dirección vertical F . Para ello, se integra la función de presión sobre el área superior mostrada en la figura 4.2, como se muestra en la siguiente expresión:

$$F_y = \int_0^L P_{(x)} 2L_{(x)} dx \quad (17)$$

Dividiendo (17) por la tensión umbral límite a tracción pura del material γ , e introduciendo las variables adimensionales (9), (10) Y (11), se obtiene la expresión (18) para el cálculo de la fuerza de bruñido adimensional F^* .

$$F^* = \int_0^1 P_{(x^*)}^* D_B e 2\sqrt{(2x^* - x^{*2})} dx^* \quad (18)$$

Integrando la función (18) con P^* constante, se obtiene la fuerza vertical de bruñido adimensional, para el intervalo de condiciones de bruñido definidas en (16).

$$F^* = P^* D_B e \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

A partir de la función (19) se define el número adimensional B , que caracterizará el problema de bruñido, para todos los modelos desarrollados en esta tesis. Siendo B :

$$B = \frac{F}{\gamma D_B e} \quad (20)$$

Para este primer modelo o primera aproximación, el número adimensional B es constante e igual a $\frac{\pi}{\sqrt{3}}$, si $P^* = \frac{2}{\sqrt{3}}$.

4.3. Segunda aproximación a la solución de la ecuación representativa del modelo físico para la deformación de un cuerpo que se auto-endurece

La segunda aproximación consiste en introducir en el modelo anterior, el efecto del endurecimiento que va sufriendo el material a medida que ocurre el proceso de deformación. Para ello se introduce una función constitutiva que describe el endurecimiento por deformación que experimenta el material, en un conformado en frío [Hosford, W and Caddell, R.M.; 1993]. La función constitutiva empleada, es de tipo exponencial como se muestra a continuación en (21).

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (21)$$

Donde ε , es la tasa de deformación real inducida, la que produce un nuevo umbral de esfuerzo σ , causado por el grado de endurecimiento que induce la tasa de deformación: K y n son constantes del material. K , es el coeficiente de fuerza, definido como: la tensión real para una cierta tasa de deformación real igual a la unidad y n es el coeficiente de autoendurecimiento por deformación del material.

Para que el modelo descrito en el apartado 4.2, incorpore el efecto del endurecimiento por deformación, es necesario introducir la función (21) en el modelo anterior. El comportamiento plástico perfecto, introducido en el modelo anterior, se realiza mediante el criterio de plasticidad de von Misses (13). Por lo tanto, si el material tiene un comportamiento plástico con endurecimiento, el criterio de plasticidad adimensional (13) toma la forma siguiente de (22).

$$\sigma^* + P^* = \text{Max} \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}}, \frac{K}{\gamma} \varepsilon^n \right\} \quad (22)$$

Remplazando simultáneamente: P^* de (22), en la función en (12), se obtiene un nuevo modelo que incorpora, a lo anterior, el endurecimiento por deformación:

$$\frac{d\sigma^*}{dx^*} + (1 - x^*) \sigma^* \left[\frac{1}{(2x^* - x^{*2})} + 2 \frac{e}{L_m} \right] = (1 - x^*) 2 \frac{e}{L_m} \text{Max} \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}}, \frac{K}{\gamma} \varepsilon^n \right\} \quad (23)$$

Para poder solucionar la ecuación (23), es necesario conocer la tasa de deformación real, asociada a un determinado estado de tensiones. Por lo tanto, se requiere de una función adicional, que relacione la tasa de deformación con la tensión. Este es un problema en el cual están acoplados los campos de tensiones y deformaciones. La

función que permite acoplar el problema de tensión y deformación, en un régimen de deformación plástica (plástico perfecto), es la ecuación de Saint Venant-von Mises [Kachanov, L.M.; 2004]. Por lo tanto, para un problema de tensiones planas, en el cual se asume que σ y $-P$ son las tensiones normales principales, como es el caso en estudio, la relación entre las tensiones y las deformaciones tiene la forma de (24).

$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = \frac{2\sigma - P}{-2P - \sigma} \quad (24)$$

Donde ε_x y ε_y son la tasa de deformación, en la dirección vertical y horizontal (figura 4.1), respectivamente.

En general, cada vez que se simula el campo de tensiones, se puede constatar que la presión adimensional P^* es, por lo menos, 30 veces mayor que la tensión adimensional en la dirección horizontal σ^* , para todo e/Lm que esté en el intervalo definido en (16). Por lo tanto la función (24) se reduce a:

$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} = -\frac{1}{2} \quad (25)$$

Para poder solucionar numéricamente la función (23), se debe tener primero una estimación de la tasa de deformación real inducida ε . Para ello se asume que la intensidad de la tasa de deformación H es un buen estimador de la tasa de deformación real.

Luego, para un problema de tensión plana, la intensidad de la tasa de deformación H , es de la forma de la función (26).

$$H = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + \varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2} \quad (26)$$

Donde ε_1 y ε_2 son las tasa de deformación, asociadas a las tensiones normales principales. Asumiendo que ε_x y ε_y son las tasa de deformación, asociadas a las tensiones principales ε_1 y ε_2 , respectivamente, la función (26) se reduce a (27).

$$H = 2\sqrt{\frac{7}{3}}\varepsilon_x \quad (27)$$

Por definición, la tasa de deformación en la dirección horizontal ε_x es:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial V_x}{\partial x} \quad (28)$$

Donde, V_x es el campo de velocidades en la dirección x . Por lo tanto, es necesario conocer la distribución de velocidades en la dirección x . Para ello se debe introducir la ecuación de conservación de la masa en el modelo. Asumiendo que la densidad del material de la pieza de trabajo es constante durante todo el proceso de deformación, la ecuación de conservación de la masa en x , se reduce a (29).

$$\frac{\partial Q_x}{\partial x} = 0 \quad (29)$$

Donde, Q_x es el caudal de material que cruza un elemento infinitesimal de longitud dx . Por lo tanto, la ecuación de conservación de la masa, para el elemento diferencial mostrado en la figura 4.2, toma la forma de (30).

$$\frac{d}{dx} \left([L_m - (e - h_{(x)})] V_x \right) = 0 \quad (30)$$

Integrando la función (30) con la condición inicial (31)

$$V_{x(x=0)} = V_a \quad (31)$$

Donde, V_a es la velocidad de avance, de la bola de bruñir. Se obtiene el campo de velocidades en la dirección x , definido por la función (32).

$$V_x(x) = \frac{L_m}{L_m - e - h_{(x)}} V_a \quad (32)$$

Luego, la tasa de deformación en la dirección vertical ε_x , que se define como la derivada de la función (32), se expresa por la relación (33).

$$\frac{dV_x}{dx}(x^*) = 2 \frac{V_a}{L_m} \sqrt{\frac{e}{D_B}} (1 - x^*) \quad (33)$$

Por último, reemplazando la función (33) en (28), para luego remplazar la tasa de deformación real ε en (23), por la intensidad de la tasa de deformación H , se tiene una ecuación diferencial que predice la tensión en la dirección horizontal σ , cuando hay endurecimiento por deformación.

$$\frac{d\sigma^*}{dx^*} + (1-x^*)\sigma^* \left[\frac{1}{(2x^* - x^{*2})} + 2\frac{e}{L_m} \right] =$$

$$(1-x^*)2\frac{e}{L_m} \text{Max} \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}}, \frac{K}{\gamma} \left[6,1 \frac{V_a}{\sqrt{L_m D_B}} \sqrt{\frac{e}{L_m}} (1-x^*) \right]^n \right\} \quad (34)$$

La solución de la ecuación (34), con la condición inicial (15), permite obtener la distribución de tensiones en el material, en función de la velocidad de bruñido V_a . Una solución numérica realizada con el método de las diferencias finitas, es aplicada a la ecuación (34). Una vez obtenida la distribución de tensiones discreta σ_i^* , se obtiene la distribución de presión discreta P_i^* , por medio de la expresión (22). Las simulaciones se han sido realizadas para dos materiales diferentes: Aluminio A92017 (figura 4.3) y Acero G10380 (figura 4.4). Las propiedades de estos materiales han sido determinadas experimentalmente siguiendo la metodología propuesta por (Hosford, W.F. & Caddell, R.M., 1993) y están resumidas en la tabla 4.1 (ver anexos 1 y 2).

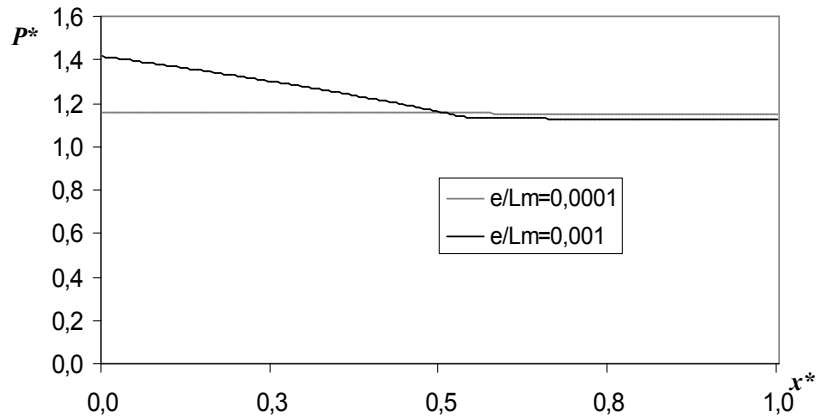


Figura 4.3. Gráfico representativo de la variación de los valores de presión adimensional en función de la longitud de contacto adimensional de la bola, para diferentes valores de e/L_m en el Aluminio A92017

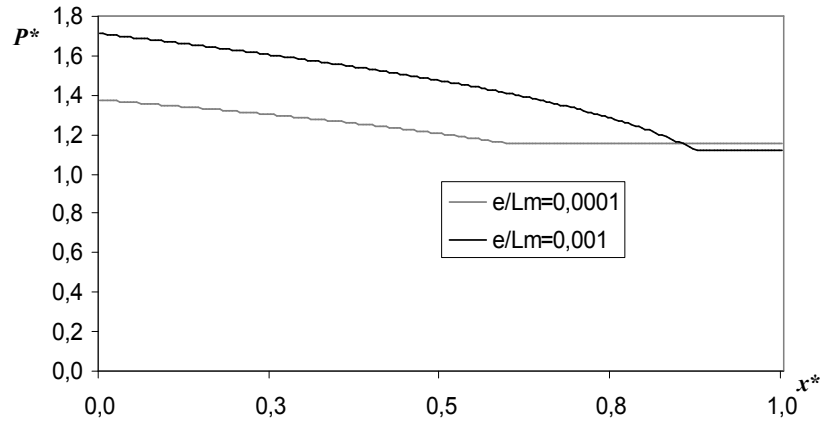


Figura 4.4. Gráfico representativo de la variación de los valores de presión adimensional en función de la longitud de contacto adimensional de la bola, para diferentes valores de e/Lm en el Acero G10380

Denominación del material	Densidad ρ (g/mm ³)	Módulo de Young E (GPa)	K (MPa)	n (adimensional)	γ (MPa)
Aluminio A92017	0,00279	76,145	368	0,260	140
Acero G10380	0,00784	211,795	1117	0,190	416

Tabla 4.1. Constantes del modelo y propiedades de los materiales determinadas a través de experimentos

En las figuras 4.3 y 4.4, como se ha comentado anteriormente, se puede ver la distribución de presión adimensional tanto en el aluminio como en el acero. La presión en el aluminio, es constante e igual a 1,15 si e/Lm es menor o igual que 0,0001; en cambio para valores e/Lm iguales a 0,001 la distribución de presión no es constante. Esta última situación es similar a lo que sucede con el acero, existe una presión máxima al comienzo de la deformación ($x^*=0$). En general, a medida que crece la relación e/Lm , aumenta la presión adimensional de bruñido, aumento que se relaciona con el endurecimiento por deformación.

En la figura 4.5 se puede ver el comportamiento que tiene el número B , en función de la relación e/Lm y de la velocidad de bruñido Va .

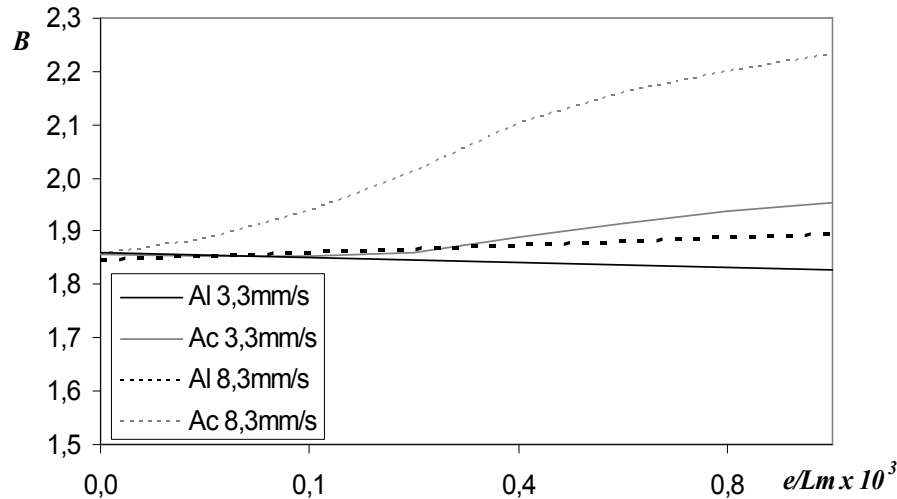


Figura 4.5. Gráficos representativos del número B , en función de la relación e/Lm

En la figura anterior se puede ver que el aluminio es poco sensible a los cambios en la velocidad de bruñido, en cambio el acero es muy sensible a cambios en la velocidad de avance en el bruñido. En la tabla 4.2, se puede ver como un cambio en la velocidad de bruñido Va afecta al número B , un cambio de 3,3 a 8,3 mm/s produce un aumento del número B en un 7,3%, por otra parte, la contribución del endurecimiento por deformación cuando se bruña a 8,3 mm/s es del orden del 9,8%.

ΔVa	ΔB
3,3 – 8,3 mm/s	7,3%
0 – 8,3 mm/s	9,8%

Tabla 4.2. Cambio experimentados por el número de bruñido B con la variación de la velocidad de avance en el proceso de bruñido Va

4.4. Validación de los modelos matemáticos

Para validar los modelos antes desarrollados, se procede a bruñar 2 piezas diferentes, previamente mecanizada con una fresa esférica de diámetro 4 mm y dos filos de corte, con las siguientes condiciones de corte: velocidad de giro del husillo 12000 min^{-1} , velocidad de avance 16,6 mm/s, profundidad de corte 0,5 mm y paso lateral 0,5 mm. En la figura 4.6 se pueden ver las piezas utilizadas en los experimentos, las franjas verticales corresponden a la superficie bruñida, perpendicular al avance de la fresa frontal.

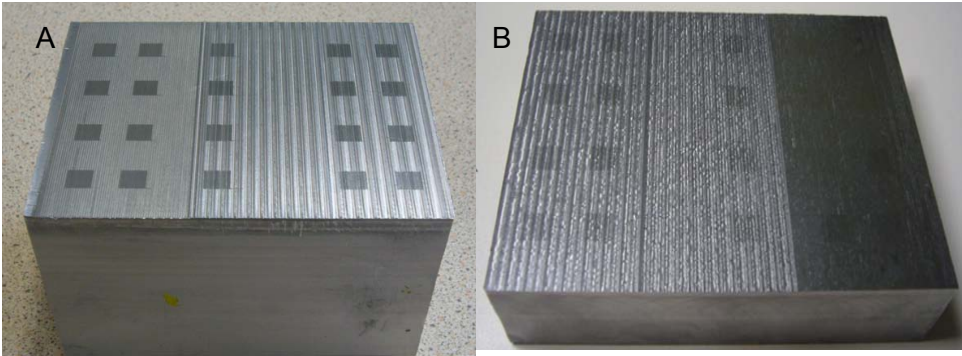


Figura 4.6. Probetas de (A) aluminio A92017 y (B) acero G10380, utilizadas para los ensayos de validación del modelo físico

La validación consiste en determinar el número B para los diferentes experimentos realizados. De la tabla 4.1 se tiene el esfuerzo de fluencia γ para ambos materiales, en la tabla 4.3 se tiene el diámetro de la bola D_B y la altura de las probetas utilizadas L_m . Por lo tanto para evaluar el número B , solo falta determinar la profundidad de bruñido e para los diferentes experimentos. La determinación de la profundidad de bruñido se realiza midiendo el salto que existe entre la zona bruñida y la zona fresada en cada uno de los experimentos. El salto es determinado a partir de un gráfico de rugosidad superficial como el que se muestra en la figura 4.7. En esta figura se pueden ver dos topografías superficiales diferentes, la correspondiente a la zona fresada, donde se pueden ver las huellas dejadas por la fresa cilíndrica y las correspondientes a la zona bruñida.

Velocidad de avance V_a	3,3-8,3 m/s
Diámetro de la bola D_B	10 mm
Altura de la probeta L_m	30 mm

Tabla 4.3. Condiciones con las que se realizaron los experimentos

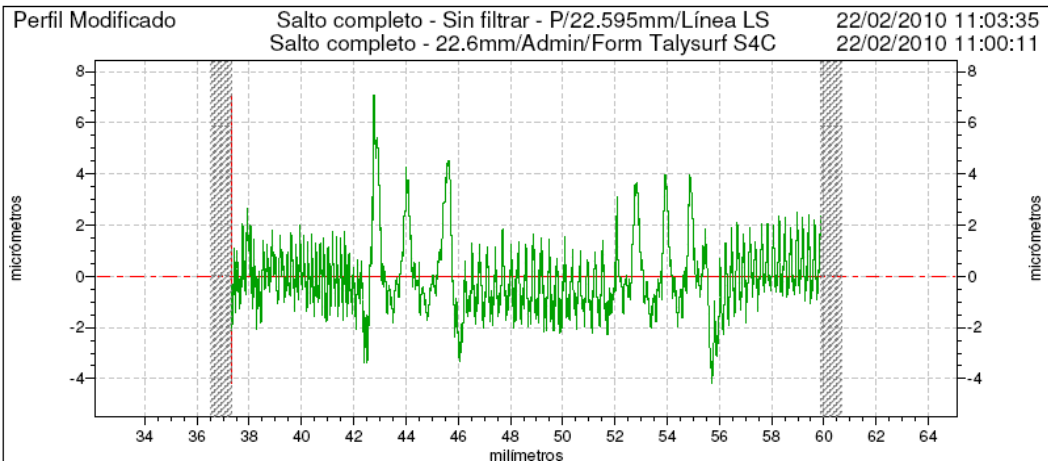


Figura 4.7. Gráfico de rugosidad superficial de un perfil en la zona de la pieza donde se puede observar el salto de la zona fresada a la zona bruñida de la misma

Las experiencias prácticas se realizan en un centro de mecanizado HURON con CNC SIEMENS (figura 4.8) ubicado en el *Laboratoire Genie de Production de l'ENIT*. Es un centro de mecanizado que puede trabajar a altas velocidades y con unas prestaciones diferentes al utilizado en el primer experimento. La presión hidráulica sobre la herramienta se puede regular y puede tomar valores entre 3 y 5 bar.



Figura 4.8. Centro de Mecanizado HURON

En el gráfico de la figura 4.9 se puede observar como varía el número de bruñido B , en función de la relación e/Lm , para los dos materiales en estudio y los resultados de los experimentos realizados.

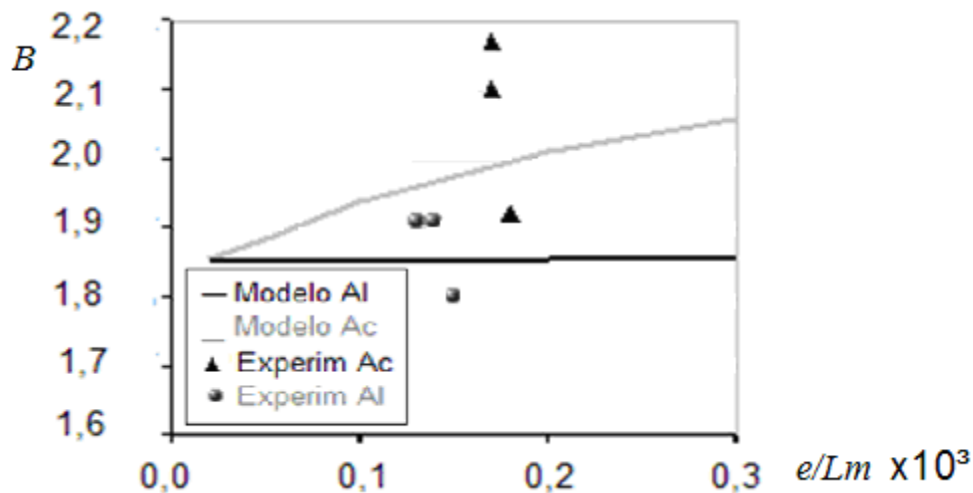


Figura 4.9. Gráficos representativos del número B , en función de la relación e/Lm para los datos del modelo y los experimentos

En el gráfico de la figura anterior las líneas representan las curvas simuladas con los modelos para el Aluminio A96351, en negro y para el Acero G10380, en gris. Los puntos grises representan los resultados medidos en los experimentos para el aluminio y los triángulos negros para el acero.

Como se puede ver los triángulos negros están más cerca de la curva del acero y los puntos grises de la curva del modelo para el aluminio, por lo tanto el modelo es capaz de separar los resultados para cada material. La diferencia entre los puntos y la línea del modelo está en el orden de 0,10 unidades para el aluminio y en el caso del acero, la diferencia está en el orden de 0,10 a 0,15 unidades.

Respecto a las curvas del modelo, se observa que el número de bruñido B, aumenta en el acero, lo cual quiere decir que hay más endurecimiento en este material que en el aluminio. Este resultado es coherente ya que en el acero hay más endurecimiento porque se ha aplicado más fuerza para poder deformarlo, al tratarse de un material menos plástico que el aluminio.

Con el modelo desarrollado se podría evaluar el orden de endurecimiento del material que se bruñe, puesto que se puede establecer una relación entre la fuerza que se aplica y la dureza que adquiere el material.

Los resultados para ambos materiales son correctos, con lo cual se podría considerar que el modelo desarrollado se ajusta bastante bien a la realidad.

Capítulo 5. Experimentos para la valoración de la influencia de las variables del proceso sobre los resultados del mismo

El modelo físico del capítulo anterior ha sido validado con resultados experimentales y como se ha podido comprobar estos resultados se ajustan de forma adecuada a la curva obtenida. Para dicha validación se han utilizado como variables: la relación entre el salto y la rugosidad superficial máxima pico–valle (e/Rt) y la fuerza de bruñido (F). Hay otras variables que implícitamente quedan reflejadas en el modelo como son: la velocidad con que avanza la herramienta (a); la presión hidráulica que llega a la misma (P) y la profundidad que se le da al cabezal de la máquina (t). Estas dos últimas determinan los valores resultantes de fuerza de bruñido. Sería bueno comprobar, eso si, de manera explícita que influencia directa tienen a , P y t , sobre los resultados del proceso.

Por otra parte, estos no son los únicos parámetros que al variar su valor pueden afectar los resultados del proceso, ya que el modelo descrito en el capítulo 4 representa lo que ocurre en una línea de la superficie de la pieza que está siendo bruñida, pero no en su totalidad. Con lo cual hay otros parámetros como son: la distancia lateral entre pasadas de la herramienta o paso lateral (p) y la estrategia de mecanizado seguida al bruñir la pieza o lo que es lo mismo la dirección seguida con la herramienta respecto a la dirección del mecanizado previo (D), que también sería interesante ver como afectan a los resultados del proceso.

Por último, el proceso de bruñido es conveniente aplicarlo sobre superficies planas por las ventajas que el mismo aporta, las cuales ya han sido valoradas en apartados anteriores. Pero también es un proceso que podría ser aplicado en superficies complejas y en este caso incluso se puede convertir en una alternativa muy competitiva. En el modelo físico tampoco se valoran los resultados para este tipo de superficies.

Por todas estas razones se realizaron diferentes experimentos para analizar como influyen los parámetros antes mencionados sobre los resultados del proceso de bruñido. El objetivo fundamental de aplicar un bruñido a una pieza, es mejorar su calidad superficial, por tanto un buen indicador de sus resultados es precisamente la rugosidad superficial que queda en las piezas después de ser bruñidas.

Para comprobar la calidad superficial de las piezas ensayadas, se midieron los indicadores de rugosidad superficial media (Ra) y rugosidad máxima total en la longitud de evaluación (Rt), en dos

direcciones: la paralela y la perpendicular a la dirección del avance de la operación de fresado previo realizado en la cara de la pieza a medir. Estos indicadores están definidos según normas ISO en el anexo 4.

Se realizaron además varios experimentos variando en cada uno de ellos las variables a analizar en superficies planas, cóncavas y convexas, con el objetivo de demostrar la eficacia del proceso de bruñido en diferentes tipos de superficies. También se emplearon 3 materiales diferentes cuyas propiedades fueron determinadas experimentalmente a través de un ensayo de tracción según la metodología planteada por (Hosford, W.F. & Caddell, R.M., 1993). En el anexo 1, se pueden encontrar su composición química, sus propiedades mecánicas y otras propiedades importantes de los mismos. Los materiales en cuestión son:

1. Aluminio A96351 (según UNS)
2. Aluminio A92017 (según UNS)
3. Acero G10380 (según UNS)

5.1. Primer experimento. Estudio de la influencia del ancho de la pasada lateral y la velocidad de avance sobre los resultados del proceso de bruñido

Este primer experimento tiene como objetivo comprobar como influyen el paso lateral y la velocidad de avance de la herramienta sobre los resultados de rugosidad superficial obtenidos.

Se realiza un planeado de la superficie de la pieza de trabajo utilizando para ello una fresa frontal de $\varnothing 80\text{mm}$ y 5 plaquitas, con los siguientes parámetros: Velocidad de rotación del husillo= 1000 min^{-1} , Velocidad de Avance= 200 mm/min , Profundidad de corte= 0.5 mm . Después de mecanizar la pieza, en una parte de esta superficie se realiza la operación de bruñido con bola. Al final se miden las rugosidades superficiales resultantes de la operación de planeado y de la operación de bruñido.

Las experiencias prácticas se realizan en el centro de mecanizado LAGUN con un CNC FAGOR (figura 5.1) que se encuentra en el taller de mecanizado de la EUETIB - UPC. La presión hidráulica sobre la herramienta se logra utilizando el propio fluido de corte de la máquina. El valor de esta presión es de 1,4 bar. Las piezas de trabajo (figura 5.2 A y B), son de Aluminio A96351.



Figura 5.1. Centro de Mecanizado LAGUN

En la figura 5.2 C, se puede observar una fotografía de la superficie bruñida realizada con una cámara CCD-IRIS en un microscopio óptico NICON MEASSURING MM-40, a 100 aumentos. Esta operación ha sido realizada con un ancho de pasada lateral $p=0,15$ mm.

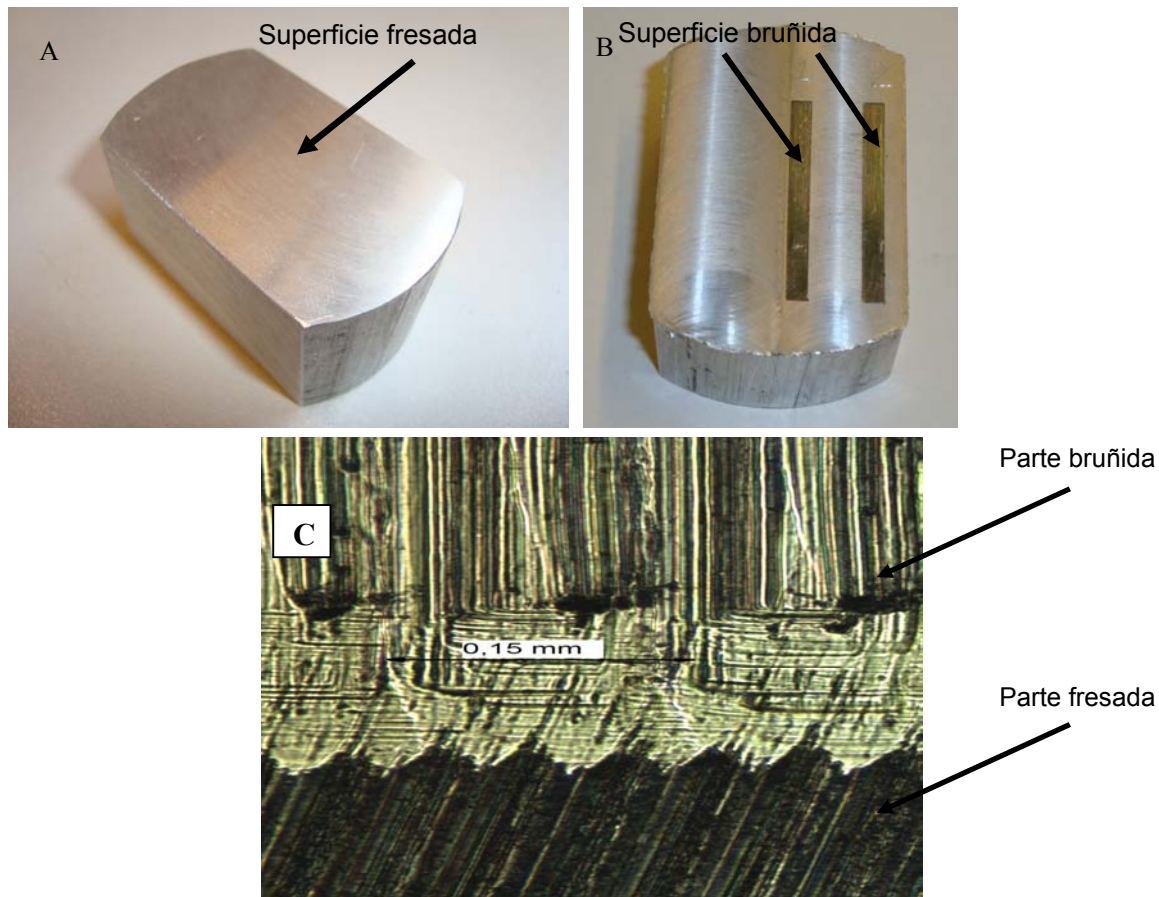


Figura 5.2. Probetas utilizadas para los ensayos de rugosidad superficial. A- Antes de bruñir, B-Después de bruñir. C- Fotografía de la superficie de la pieza

Con el objetivo de hacer la menor cantidad de pruebas y con el menor coste posible se ha diseñado un experimento utilizando técnicas estadísticas. Este consiste en evaluar tres variables teniendo en cuenta dos niveles, el mínimo y el máximo y sus puntos centrales. En función de esto queda un experimento de tipo factorial 2^3 , que consiste en combinar todas las variables, con sus niveles, entre sí, para poder observar como influyen las mismas en el acabado superficial que queda en las piezas que se elaboran a través del proceso de bruñido con bola. Esto posibilita que no sea necesario evaluar cada uno de los parámetros tecnológicos del proceso en todos y cada uno de sus puntos intermedios.

Los parámetros utilizados como variables son: El paso lateral de la operación (p), la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta (t), (parámetro que está relacionado con la fuerza a aplicar) y la velocidad de avance de la herramienta de bruñido (a). La combinación de los parámetros da como resultado 8 experimentos, con dos réplicas cada uno y 4 puntos centrales, lo cual hace un total

de 20 experimentos diferentes. Los valores que toman estas variables, así como los resultados obtenidos, se pueden observar en la tabla 5. 1.

No. Exp.	p (mm)	t (mm)	a (mm/min)	Ra par. (μm)	Rt par. (μm)	Ra per. (μm)	Rt per. (μm)
1	0,080	0,50	100	0,2729	3,5219	1,3679	10,3948
2	0,150	0,50	100	0,5678	4,4893	1,7934	17,7918
3	0,080	1,00	100	0,4603	4,0816	0,5192	10,4402
4	0,150	1,00	100	0,4203	3,0306	2,2860	12,4094
5	0,080	0,50	200	0,1575	2,2568	1,5569	16,9666
6	0,150	0,50	200	0,1712	2,1780	1,2260	8,5283
7	0,080	1,00	200	0,1560	1,2744	0,5053	9,5253
8	0,150	1,00	200	0,2363	4,1813	1,5034	12,5483
9	0,080	0,50	100	0,2803	4,2218	1,3767	10,9550
10	0,150	0,50	100	0,6856	4,1092	1,7982	18,2491
11	0,080	1,00	100	0,3139	4,9934	0,8285	10,0458
12	0,150	1,00	100	0,3052	3,2846	2,1904	12,0451
13	0,080	0,50	200	0,2738	3,4711	1,7039	16,5775
14	0,150	0,50	200	0,1775	1,4106	1,4504	8,4814
15	0,080	1,00	200	0,1957	2,5826	0,5473	9,6896
16	0,150	1,00	200	0,2747	4,1702	1,9783	11,4871
17	0,115	0,75	150	0,2779	5,2532	2,3363	19,1799
18	0,115	0,75	150	0,1317	4,1966	2,2345	20,6911
19	0,115	0,75	150	0,3330	3,9194	1,3464	13,8973
20	0,115	0,75	150	0,3461	4,6626	1,6661	12,9090
Fresado	-	-	-	1,3962	5,4717	2,5125	22,0120

Tabla 5.1.Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados

Donde:

Ra par.- Rugosidad superficial media medida en el sentido paralelo al avance del fresado

Rt par.- Rugosidad máxima pico –valle medida en el sentido paralelo al avance del fresado

Ra per.- Rugosidad superficial media medida en el sentido perpendicular al avance del fresado

Rt per.- Rugosidad máxima pico – valle medida en el sentido perpendicular al avance del fresado

5.1.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial

Como se puede observar en la tabla de resultados (tabla 5.1), independientemente del valor de los parámetros con los que se haga, el valor de la rugosidad superficial media disminuye respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, de media un 71 % en las medidas tomadas paralelas al avance y un 44 % en las tomadas perpendicularmente. Para Rt las disminuciones son de un 41 % y un 33 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente.

Han sido analizados dos indicadores de rugosidad superficial: Ra y Rt . Ambos además han sido medidos en la dirección del avance de la herramienta ($Ra_{par.}$ y $Rt_{par.}$) y en la dirección perpendicular a éste ($Ra_{per.}$ y $Rt_{per.}$). Por tal motivo se obtendrán 4 ecuaciones como (1), correspondientes cada una de ellas a cada valor medido.

En este caso será posible estimar el valor de rugosidad superficial que se debe obtener por medio de la siguiente curva de regresión:

$$R_x = \text{Constante} + C1p + C2t + C3a + C4pt + C5pa + C6ta + C7pta \quad (1)$$

Siendo el subíndice x a o t según sea el caso, resultando R_x ser Ra o Rt

En el caso de Ra medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un $R\text{-Sq}(\text{adj})^1 = 72,23\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5. 2.

Término	Coefficiente
Constante	-1,76479
C1	23,0193
C2	2,50983
C3	0,0110284
C4	-24,8529
C5	-0,126686
C6	-0,0143294
C7	0,141543

Tabla 5.2. Coeficientes de la curva de regresión para $Ra_{par.}$

En el diagrama de Pareto de la figura 5.3 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%).

¹ **R-Sq(adj)**- R cuadrado ajustado: Coeficiente estadístico que denota el nivel de ajuste de un modelo a los datos experimentales

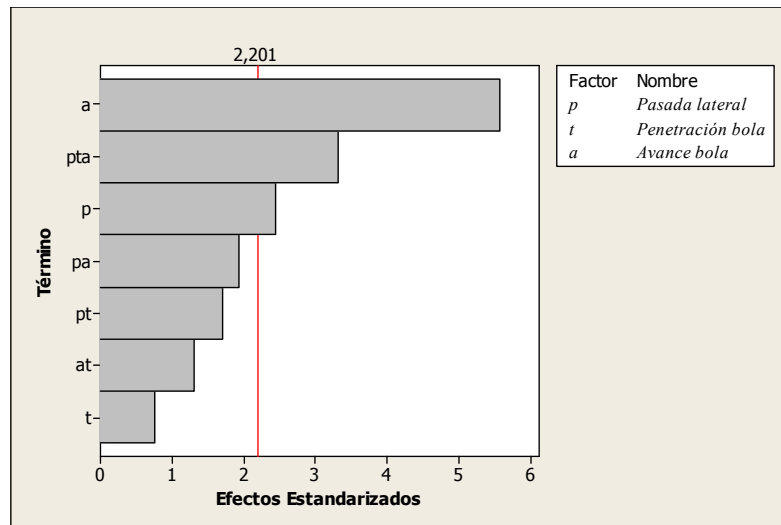


Figura 5.3. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el diagrama de Pareto anterior se puede observar que los parámetros significativos para los valores medidos de Ra son la velocidad de avance de la herramienta, la combinación de las tres variables y el paso lateral.

La velocidad de avance tiene una relación directa con la tasa de la velocidad de deformación del material, lo que a su vez se relaciona con el endurecimiento por deformación (ecuación 4.34). Se puede ver entonces, la importancia relativa que tiene en la predicción del número B , el efecto del endurecimiento por deformación, que según el diagrama de la figura anterior, es del orden del 50%. Esto deja evidencia de la importancia que tiene el endurecimiento por deformación o lo que es igual, la velocidad de avance, sobre los resultados del proceso en la pieza.

El ancho de la pasada lateral es un parámetro significativo, como se puede observar en el diagrama de Pareto. En función de los valores que tome este parámetro, la herramienta tendrá que deformar un material que estará más o menos endurecido. En un primer caso, si la distancia de pasada lateral entre un recorrido de la herramienta y el siguiente es mayor que el ancho de la superficie de contacto entre la bola y la pieza, entonces p , no afecta los resultados del proceso, pues el material que se deforma no ha sido bruñido en una pasada previa. En un segundo caso, si por el contrario p es menor que la superficie de contacto entre la bola y la pieza, entonces sí que afectará los resultados del proceso, producto de que una parte del material a bruñir ya ha sido bruñido en una pasada previa, con lo cual estará endurecido. En este experimento, al ser p un parámetro significativo se podría concluir que se está en presencia del segundo caso.

Se puede observar también que los valores de la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta sin embargo, no son significativos producto de que los mismos toman valores pequeños (0,5 a 1 mm). Esto fue seleccionado así ya que el diseño de la herramienta utilizada no permite tomar valores mayores. No obstante en combinación con los otros dos parámetros si que ejerce influencia sobre los valores de Ra y esta explicación se puede encontrar en el modelo físico, donde se puede ver que el valor de la profundidad de penetración de la bola influye sobre el salto obtenido (e).

En el gráfico de la figura 5.4 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de Ra resultantes.

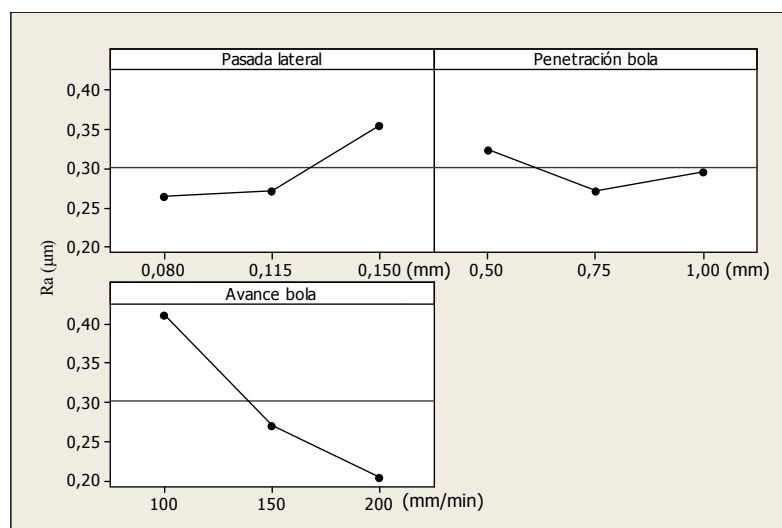


Figura 5.4. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

Se ve claramente que los valores de Ra disminuyen cuando el paso lateral es más pequeño y cuando la velocidad de avance de la herramienta es mayor.

En el caso de Rt medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un $R-Sq(adj) = 73,64\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.3.

Término	Coefficiente
Constante	-7,50809
C1	126,514
C2	20,3769
C3	0,0816034
C4	-198,043
C5	-0,945893
C6	-0,149147
C7	1,46406

Tabla 5.3. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.5 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

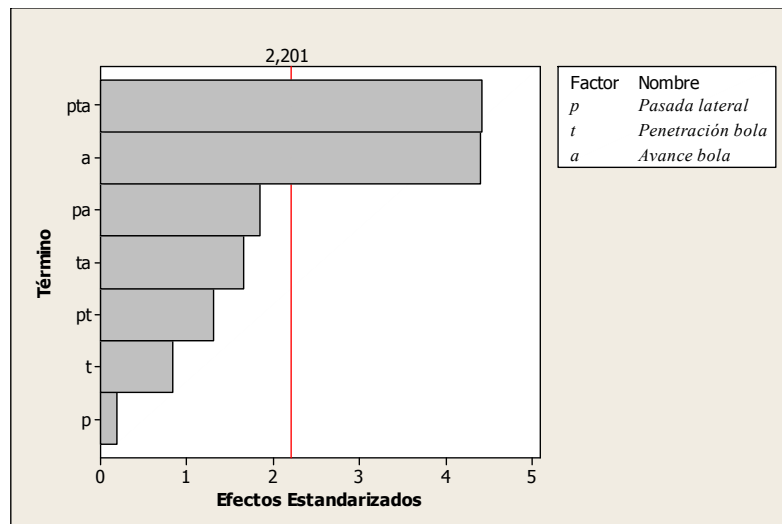


Figura 5.5. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el diagrama de Pareto anterior se puede observar que los parámetros significativos para los valores medidos de R_t son la velocidad de avance de la herramienta y la combinación de las tres variables, como para R_a . Sin embargo el paso lateral por si solo pierde protagonismo. Parece ser que p influye más sobre el perfil medio de rugosidad que sobre la rugosidad máxima pico – valle.

La combinación de las tres variables es significativa ya que la velocidad de avance de la bola es el parámetro más importante, con lo cual es quien influye en que la combinación de las tres variables sea muy significativa, puesto que en realidad la pasada lateral y la penetración del cabezal de la herramienta no son significativas por si solas.

En el gráfico de la figura 5.6 se puede observar la influencia de la variación de los parámetros del proceso sobre los valores de R_t resultantes.

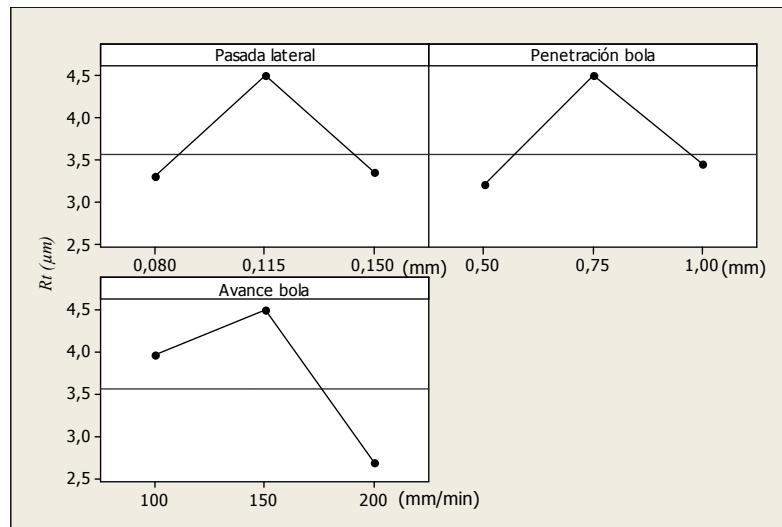


Figura 5.6. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

De la figura 5.8 anterior se puede concluir que se obtienen valores de R_t más pequeños cuando la velocidad de avance de la herramienta crece, al igual que lo observado anteriormente para R_a . No obstante se denota un comportamiento no lineal en la influencia de la velocidad de avance sobre los valores de R_t . Por otra parte la influencia del resto de los parámetros no es significativa como se ha explicado anteriormente.

En el caso de R_a medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 76,09%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.4.

Término	Coeficiente
Constante	0,99071
C1	5,2036
C2	-2,35691
C3	0,0189986
C4	22,1414
C5	-0,154514
C6	-0,0164764
C7	0,104543

Tabla 5.4. Coeficientes de la curva de regresión para R_a per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.7 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%).

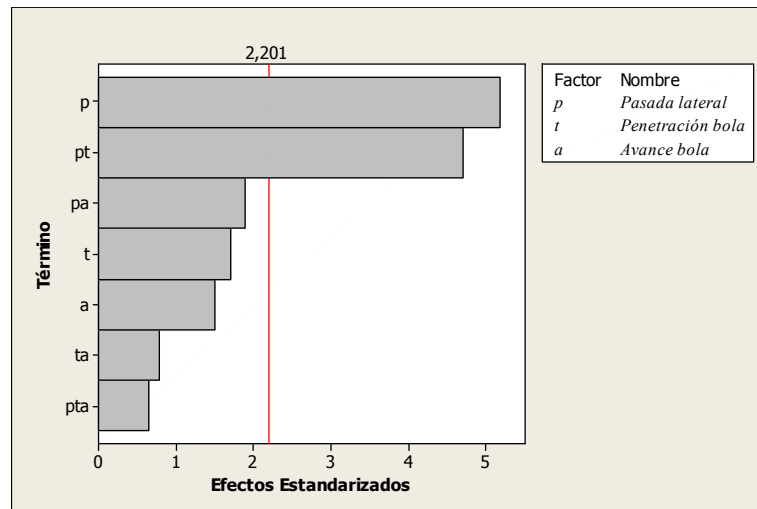


Figura 5.7. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En la figura anterior se puede observar que para los valores medidos de R_a gana protagonismo el paso lateral de la operación, cosa que es lógica, ya que se está midiendo la rugosidad donde la forma del perfil la marca precisamente el paso de la bola. También es importante la combinación entre el paso lateral y la fuerza de bruñido marcada por la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta. La velocidad de avance de la herramienta no es nada significativa en este caso, producto de que la bola avanza en la dirección perpendicular a la que se toman las mediciones en este experimento.

En el gráfico de la figura 5.8 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_a resultantes.

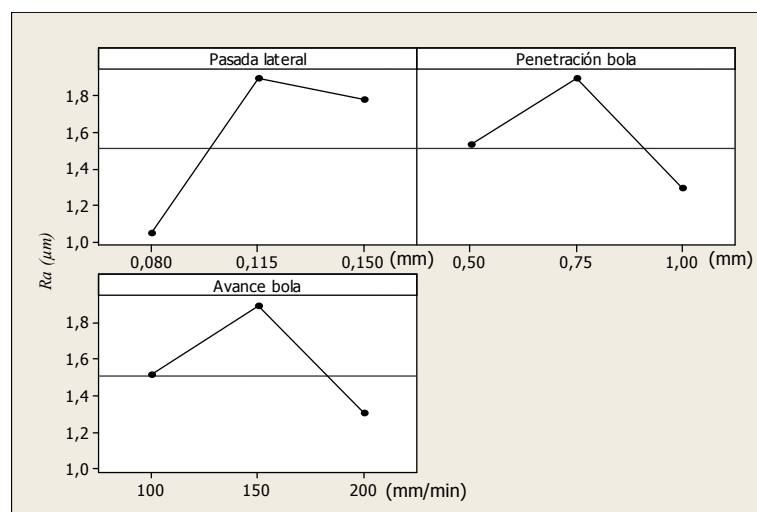


Figura 5.8. Efectos sobre R_a de las variables del proceso

R_a medida en esta dirección toma valores más pequeños cuando el paso de la operación se hace más pequeño y para la penetración del cabezal de la herramienta de 1 mm. También se denota un comportamiento no lineal respecto a estos parámetros.

Por último, en el caso de R_t medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un $R-Sq(adj) = 71,01\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.5.

Término	Coefficiente
Constante	-52,4183
C1	633,691
C2	61,516
C3	0,49003
C4	-611,43
C5	-4,52164
C6	-0,501254
C7	4,5825

Tabla 5.5. Coeficientes de la curva de regresión para R_a per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.9 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

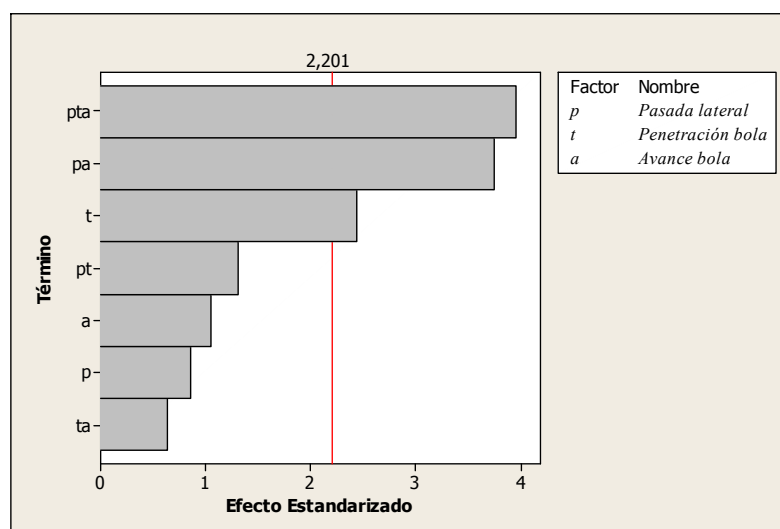


Figura 5.9. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura anterior se puede observar que para los valores medidos de R_t los parámetros más significativos son la combinación entre los tres parámetros, entre el paso lateral y la velocidad de avance y también la penetración del cabezal de la herramienta.

En el gráfico de la figura 5.10 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_a resultantes.

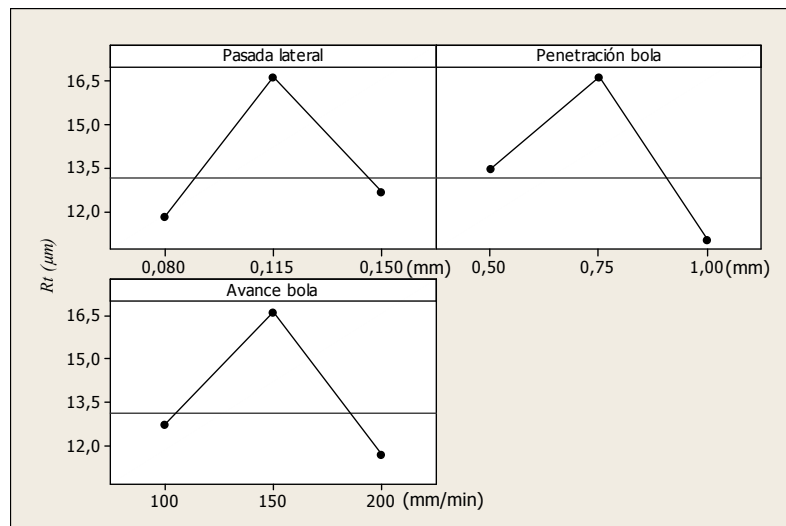


Figura 5.10. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

En este caso las tendencias son similares a las encontradas para R_a . Este resultado es lógico ya que parece ser que la rugosidad tiene un comportamiento estable para todos sus indicadores. No obstante se denota que el comportamiento tiene una cierta no linealidad, cosa que ya se observa con claridad en el modelo físico desarrollado en el capítulo anterior (expresión 4.34).

5.1.2. Comentarios sobre los resultados del experimento

Con el proceso de bruñido llevado a cabo en este experimento se puede observar que hay una disminución importante en los valores de la rugosidad superficial de las piezas ensayadas. Esto confirma que este proceso es adecuado para esta finalidad.

De manera general y para el caso del material de las piezas ensayadas, la velocidad de avance de la herramienta es un parámetro muy importante, ya que éste define la velocidad de deformación que impera en el proceso. Es bueno recordar que como ha quedado demostrado en el capítulo anterior, en el caso de este material (Al 96351), el fenómeno de auto-endurecimiento del mismo está presente durante su deformación y la tasa de deformación es función de la velocidad del proceso. Por supuesto, la influencia de este parámetro se nota sobre todo en los valores de rugosidad medidos en el sentido paralelo al avance de la herramienta. En el caso de otros materiales, como se verá más adelante este parámetro deja de tener protagonismo.

Para lograr buenas calidades superficiales para este material se hace necesario trabajar a velocidades de avance cercanos a los 200 mm/min, anchos de pasadas laterales de la herramienta pequeños (del orden de 0,08 mm) y profundidades de penetración del cabezal de la herramienta cercanas a 1 mm. De este modo se lograrán los mejores valores de R_a y R_t en ambas direcciones.

En el caso de la distancia de pasada lateral se nota más la influencia en los valores de rugosidad medidos en el sentido perpendicular al avance de la herramienta porque es esta distancia la que define justamente el perfil que se mide. El comportamiento es bastante poco lineal, pero para menores anchos de pasada se obtienen valores de rugosidad menores.

En la máquina herramienta en que se realizó este experimento, no es posible variar la presión hidráulica que actúa sobre el cabezal de la herramienta por las limitaciones del sistema de alimentación de fluido de corte de la misma. En este caso se ha mantenido a 1,4 bar. Variar este parámetro podría resultar interesante, ya que es otra manera de poder variar la fuerza que realiza la herramienta durante el proceso de bruñido. En el siguiente experimento se tendrá en cuenta esta variable.

5.2. Segundo experimento. Estudio de la influencia del aumento de la velocidad de avance y de la variación de la presión hidráulica, sobre los resultados del proceso de bruñido

En un segundo experimento se utilizan probetas elaboradas del mismo material que en el experimento anterior (figura 5.11), pero mecanizadas con condiciones de corte diferentes. Se realiza un planeado de las mismas a 16000 rpm de velocidad de corte, a 200 mm/min de velocidad de avance y 0,5 mm de profundidad de corte, con una fresa frontal de 80 mm de diámetro y 5 plaquitas de radio de punta 0,8 mm.

Estas pruebas se realizan en un centro de mecanizado HURON con CNC SIEMENS como el de la figura 4.12.

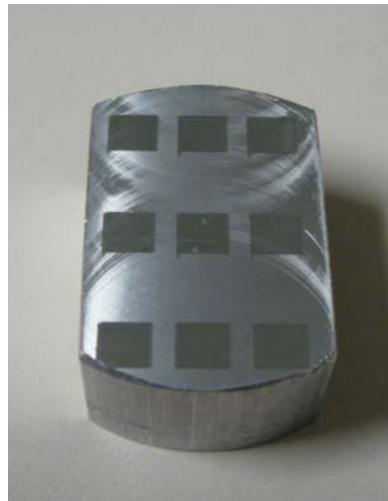


Figura 5.11. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir

En este experimento se realiza con dos objetivos. El primero, analizar que sucede cuando se aumentan las velocidades de avance con las que se realiza el bruñido, de manera que se pueda verificar si al aumentar este parámetro (lo cual hace disminuir los tiempos de mecanizado del proceso), los valores de rugosidad superficial continúan a un buen nivel.

También como se ha comentado anteriormente, se sabe que hay dos formas de aumentar la fuerza que ejerce la bola de la herramienta sobre la superficie a bruñir: aumentando la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta o aumentando la presión hidráulica a la que está sometida la misma, producto de aumentar la presión en la bomba que suministra el líquido de corte. En el caso del experimento anterior se varió la penetración del cabezal, en este caso la penetración del cabezal de la herramienta se ha mantenido constante a un valor de 1 mm y se ha variado la presión hidráulica a la que es sometida la bola para observar si tiene el mismo efecto. Con lo cual el segundo objetivo de este experimento es analizar que sucede al aumentar la presión hidráulica sobre la bola de la herramienta.

El paso lateral se toma como constante, pues en el experimento anterior ya se ha observado claramente cual es su influencia sobre los valores de rugosidad.

De esta manera los parámetros utilizados como variables son entonces: La velocidad de avance de la herramienta de bruñido (a) y la presión hidráulica medida en la entrada de la herramienta (P). La combinación de los parámetros da como resultado 4 experimentos, con dos réplicas cada uno y 2

puntos centrales, lo cual hace un total de 10 experimentos diferentes. Los valores que toman estas variables, así como los resultados obtenidos, se pueden observar en la tabla 5.6.

No. Exp.	a (mm/min)	P (bar)	Ra par. (μm)	Rt par. (μm)	Ra per. (μm)	Rt per. (μm)
1	300	2,0	0,0292	0,2824	0,2316	1,4614
2	500	2,0	0,0542	0,5971	0,5102	3,0687
3	300	3,0	0,0386	0,3157	0,2569	1,4523
4	500	3,0	0,0692	0,6964	0,4416	1,9625
5	300	2,0	0,2427	0,2427	0,2432	1,6734
6	500	2,0	0,5559	0,5559	0,4559	3,1614
7	300	3,0	0,3076	0,3076	0,3394	1,3782
8	500	3,0	0,5573	0,6573	0,4386	2,2010
9	400	2,5	0,0318	0,3820	0,2733	1,9034
10	400	2,5	0,0341	0,4366	0,3655	2,0581
Fresado			0,3424	3,4814	1,01685	5,8178

Tabla 5.6. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados

5.2.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial

Como se puede observar en la tabla de resultados (tabla 5.6), independientemente del valor de los parámetros con los que se haga, el valor de la rugosidad superficial media disminuye respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, de media un 85 % en las medidas tomadas paralelas al avance y un 83 % en las tomadas perpendicularmente. Para Rt las disminuciones son de un 65 % y un 62 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente.

Han sido analizados también dos indicadores de rugosidad superficial: Ra y Rt . Ambos además han sido medidos en la dirección del avance de la herramienta (Ra par. y Rt par.) y en la dirección perpendicular a éste (Ra per. y Rt per.). Por tal motivo se obtendrán 4 curvas de regresión como (2), correspondientes cada una de ellas a cada valor medido.

$$R_x = \text{Constante} + C_1 a + C_2 P + C_3 a P \quad (2)$$

Siendo el sufijo x a o t según sea el caso, resultando R_x ser Ra o Rt

En el caso de Ra medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 44,62%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.7.

Término	Coeficiente
Constante	0,050225
C1	$-1,325 \cdot 10^{-5}$
C2	-0,01635
C3	$4,25 \cdot 10^{-5}$

Tabla 5.7. Coeficientes de la curva de regresión para R_a par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.12 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

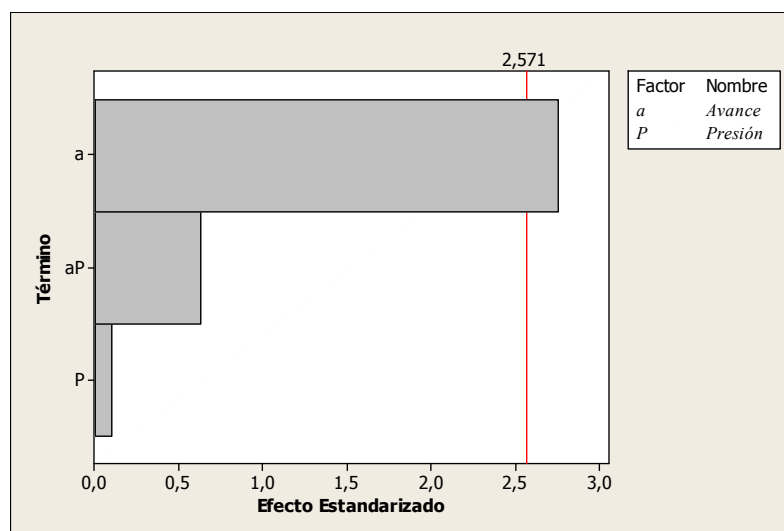


Figura 5.12. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura anterior se puede observar que para los valores medidos de R_a el único parámetro significativo es la velocidad de avance de la herramienta. La presión no es un parámetro significativo en este caso y la explicación se podría encontrar en el modelo físico propuesto en el capítulo 4. La presión de trabajo llega a un valor cercano a la tensión límite a corte puro del material y en ese momento el material comienza a fluir. Si a continuación se continúa aumentando la presión, este cambio no afecta demasiado al proceso de deformación del material. Habría que tener en cuenta además que el **R-Sq(adj)** tiene un valor bajo, lo cual significa que los resultados no se ajustan demasiado a la curva de regresión lineal propuesta en este rango de valores de los parámetros tomados como variables.

En el gráfico de la figura 5.13 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_a resultantes.

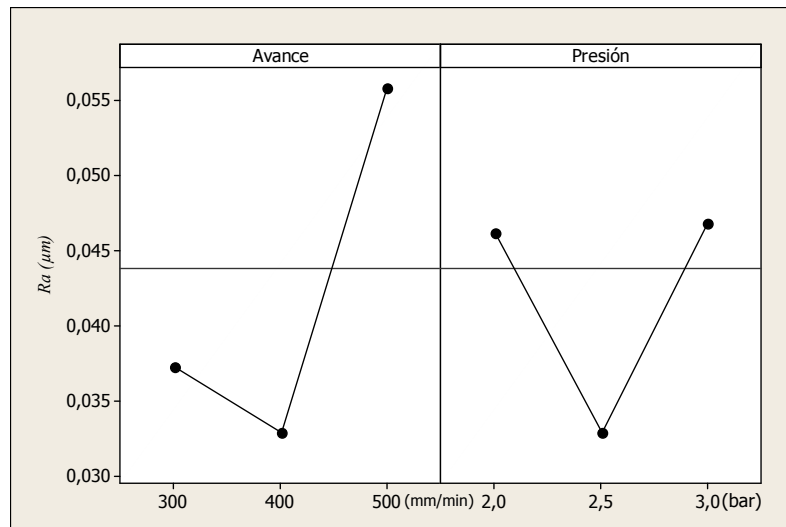


Figura 5.13. Efectos sobre R_a de las variables del proceso

Al aumentar los valores de la velocidad de avance de la herramienta los valores de R_a disminuyen como en el experimento anterior, pero se denota que al pasar el valor de 400 mm/min hay una inflexión en este comportamiento. En el caso de la presión sobre la bola se ve un punto de inflexión alrededor del valor medio del intervalo escogido, al igual que en la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta utilizada como variable en el experimento anterior.

Para R_t medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 97,18%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.8.

Término	Coeficiente
Constante	-0,152825
C1	0,00105725
C2	-0,027775
C3	0,00025625

Tabla 5.8. Coeficientes de la curva de regresión para R_t par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.14 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

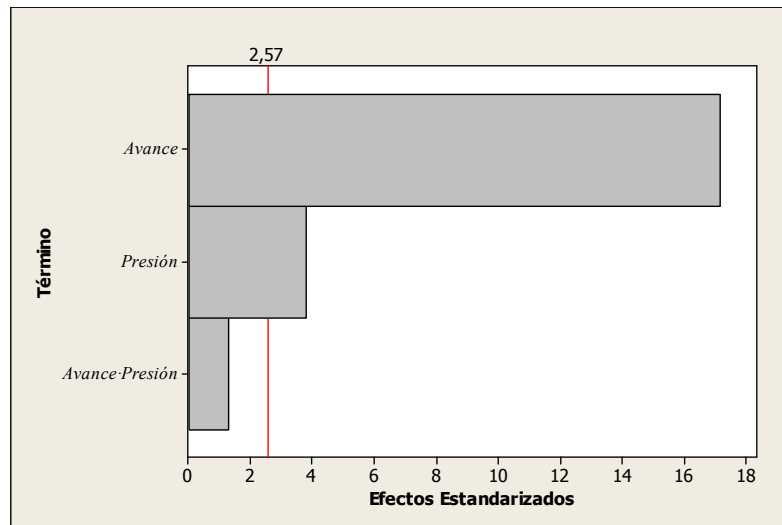


Figura 5.14. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para R_t , ambos parámetros son significativos. Respecto a los resultados obtenidos para R_a , este comportamiento tiene sentido ya que para R_t el efecto de la variación de la presión que ejerce la bola sobre el material es más importante. La velocidad de avance sigue siendo el parámetro más importante en este material.

La influencia de la combinación de ambos parámetros no es significativa, con lo cual se puede eliminar de la curva de regresión y volver a analizar los datos.

En el nuevo análisis y para un **R-Sq(adj) = 96,87%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.9.

Término	Coeficiente
Constante	-0,409075
C1	0,00169787
C2	0,0747250
C3	0

Tabla 5.9. Coeficientes de la curva de regresión para R_a per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.15 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

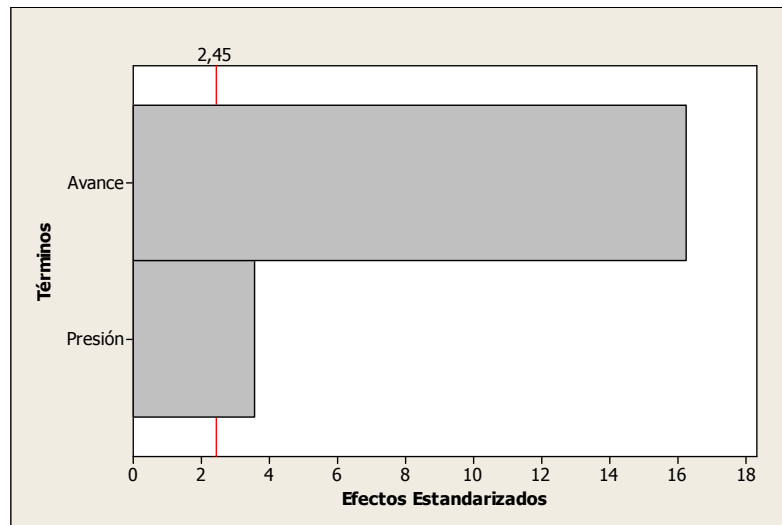


Figura 5.15. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.16 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro significativo sobre los valores de R_t resultantes.

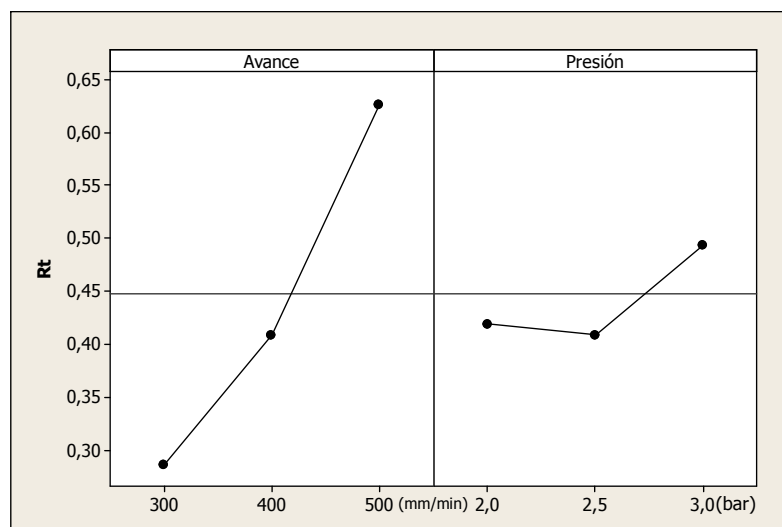


Figura 5.16. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

En el gráfico anterior, el aumento de la velocidad de avance provoca un aumento de R_t . Aquí la inflexión ocurre en 300 mm/min si seguimos el comportamiento encontrado en el experimento anterior. Para la presión sobre la bola, también hay un cambio de comportamiento, el cual se denota no lineal. Este comportamiento se relaciona con el del modelo físico planteado.

Para R_a medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 82,22\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.9.

Término	Coeficiente
Constante	-0,563675
C1	0,00226525
C2	0,2163
C3	$-5,185 \cdot 10^{-4}$

Tabla 5.10. Coeficientes de la curva de regresión para R_t par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.17 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

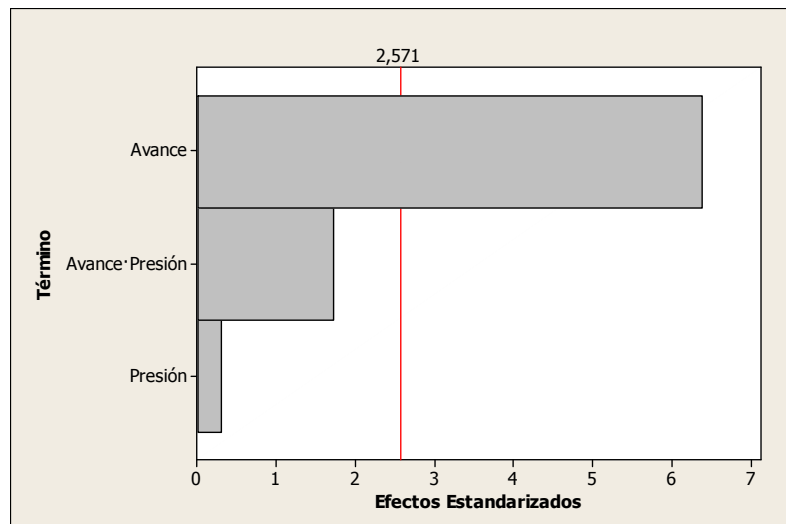


Figura 5.17. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Nuevamente y como para las medidas de R_a tomadas paralelas al avance, se puede observar que el único parámetro significativo es la velocidad de avance de la herramienta. Eso si, en este caso el $R\text{-Sq}(\text{adj})$ tiene un valor adecuado.

Para analizar si el parámetro velocidad de avance es realmente el más importante se hace un análisis de correlación de los datos. Con un nivel de confianza del 95 % se tratan los datos y dan como resultado lo que se muestra en el gráfico de la figura 5.18.

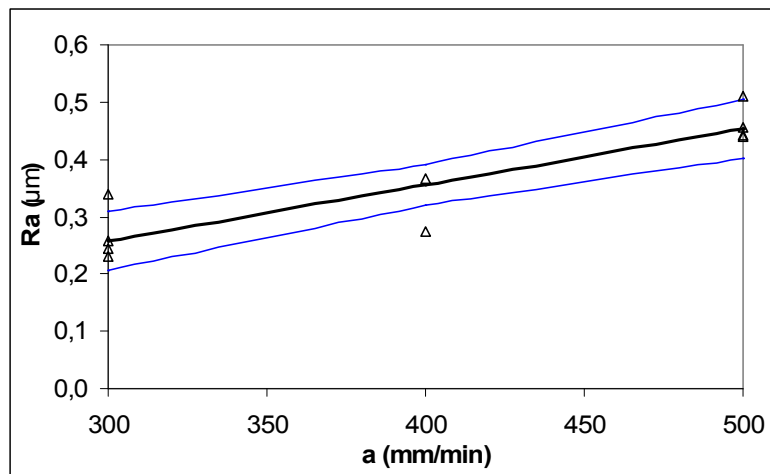


Figura 5.18. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para Ra per.

Para un **R-Sq = 89,80%** la prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F1=33,3583$ y el $F2=5,31766$. Si $F1 > F2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el experimento. De esta manera se puede afirmar para el parámetro que es significativo sobre los valores de Ra per. (la velocidad de avance de la bola), que existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos.

En este caso los coeficientes de la curva de correlación (1) del modelo reducido se pueden ver en la tabla 5.11.

Término	Coeficiente
Constante	-0,032
C1	0,001
C2	0
C3	0

Tabla 5.11. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Ra per.

El intervalo de confianza de los valores obtenidos es de $b \pm 0,0004$ y para la constante $\pm 0,1586$.

En el gráfico de la figura 5.19 se puede observar la influencia de la variación del parámetro significativo sobre los valores de Ra resultantes.

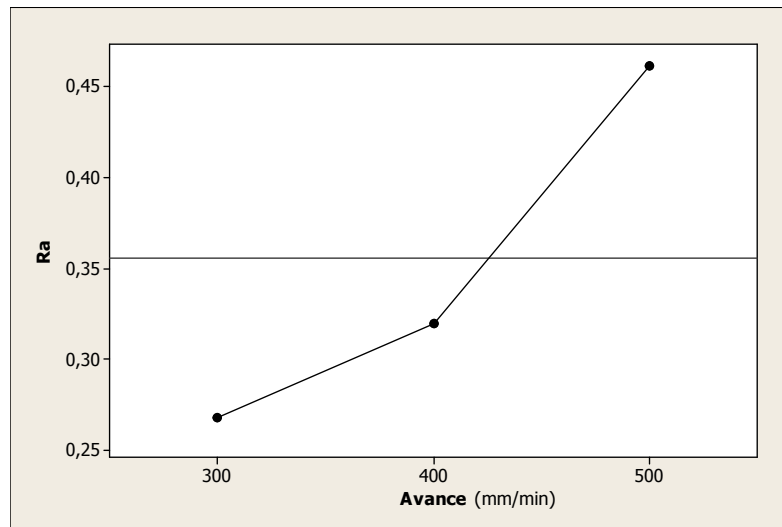


Figura 5.19. Efectos sobre Ra de la velocidad de avance

En el gráfico de la figura 5. 19, se puede observar que Ra disminuye cuando la velocidad de avance está alrededor de los 300 mm/min.

Para Rt medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 96,52%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.12.

Término	Coeficiente
Constant	-3,09322
a	0,0165497
P	1,16957
a*P	-0,00440575

Tabla 5.12. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.20 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%).

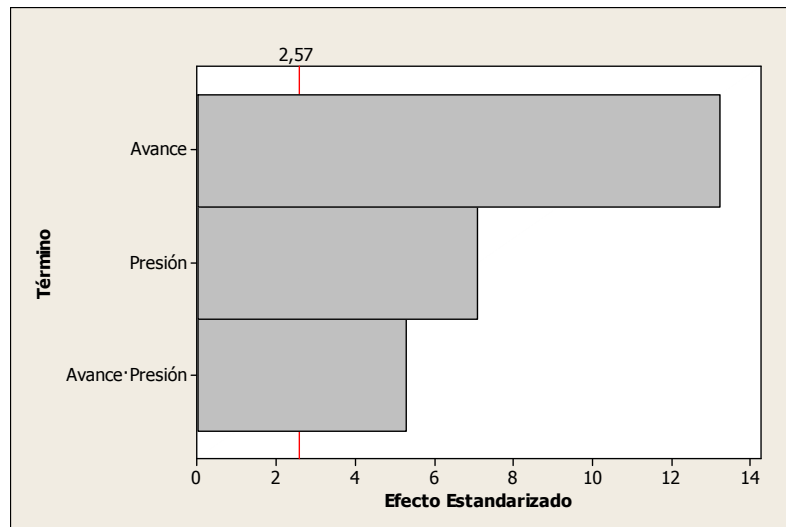


Figura 5.20. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para R_t , ambos parámetros son significativos, también en este caso la combinación de estos.

En el gráfico de la figura 5.21 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_t resultantes.

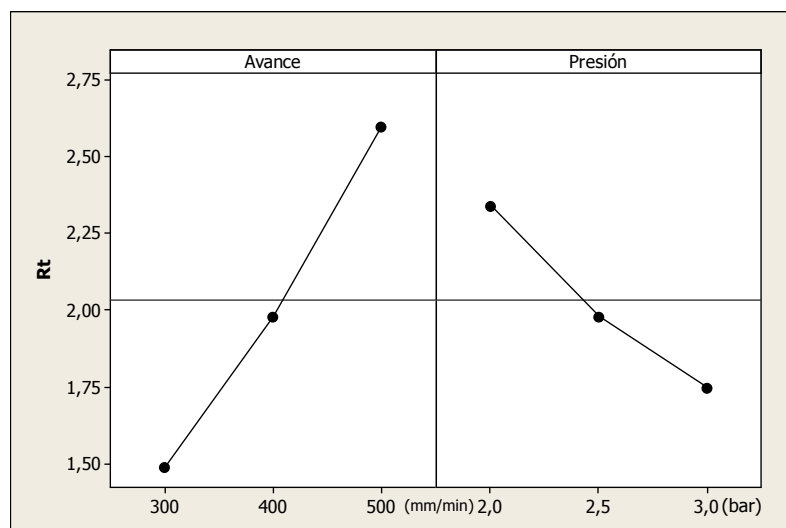


Figura 5.21. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

R_t también disminuye cuando la velocidad de avance está alrededor de los 300 mm/min. En el caso de la presión cuando aumenta esta, se obtienen valores de R_t más pequeños.

5.2.2. Comentarios sobre los resultados del experimento

Con el proceso de bruñido llevado a cabo en este experimento se puede observar que hay también una disminución importante en los valores de la rugosidad superficial de las piezas ensayadas.

La velocidad de avance de la herramienta continúa siendo el parámetro más significativo sobre los valores de rugosidad, ya que como en el caso del primer experimento éste define la velocidad de deformación que impera en el proceso.

La velocidad de avance se ha tomado entre los 300 y 500 mm/min. Se puede observar que cercanos a 300 mm/min los valores de rugosidad medidos son más pequeños, lo cual significa que la velocidad de avance se puede aumentar hasta este valor, disminuyendo así los tiempos de fabricación.

Los valores de la presión, como se ha visto se pueden aumentar, pero superado un cierto valor, no provoca prácticamente ningún efecto sobre los valores de rugosidad superficial. Esto corrobora los resultados obtenidos en el modelo físico obtenido en el capítulo 4 y graficado en la figura 4.4. Este valor a partir del cual no se ejerce ninguna influencia sobre la rugosidad de la pieza está cercano a la tensión límite a corte puro del material (K).

Después de haber realizado estos dos experimentos en probetas planas de aluminio A96351 se pueden resumir los resultados obtenidos en el siguiente gráfico resumen.

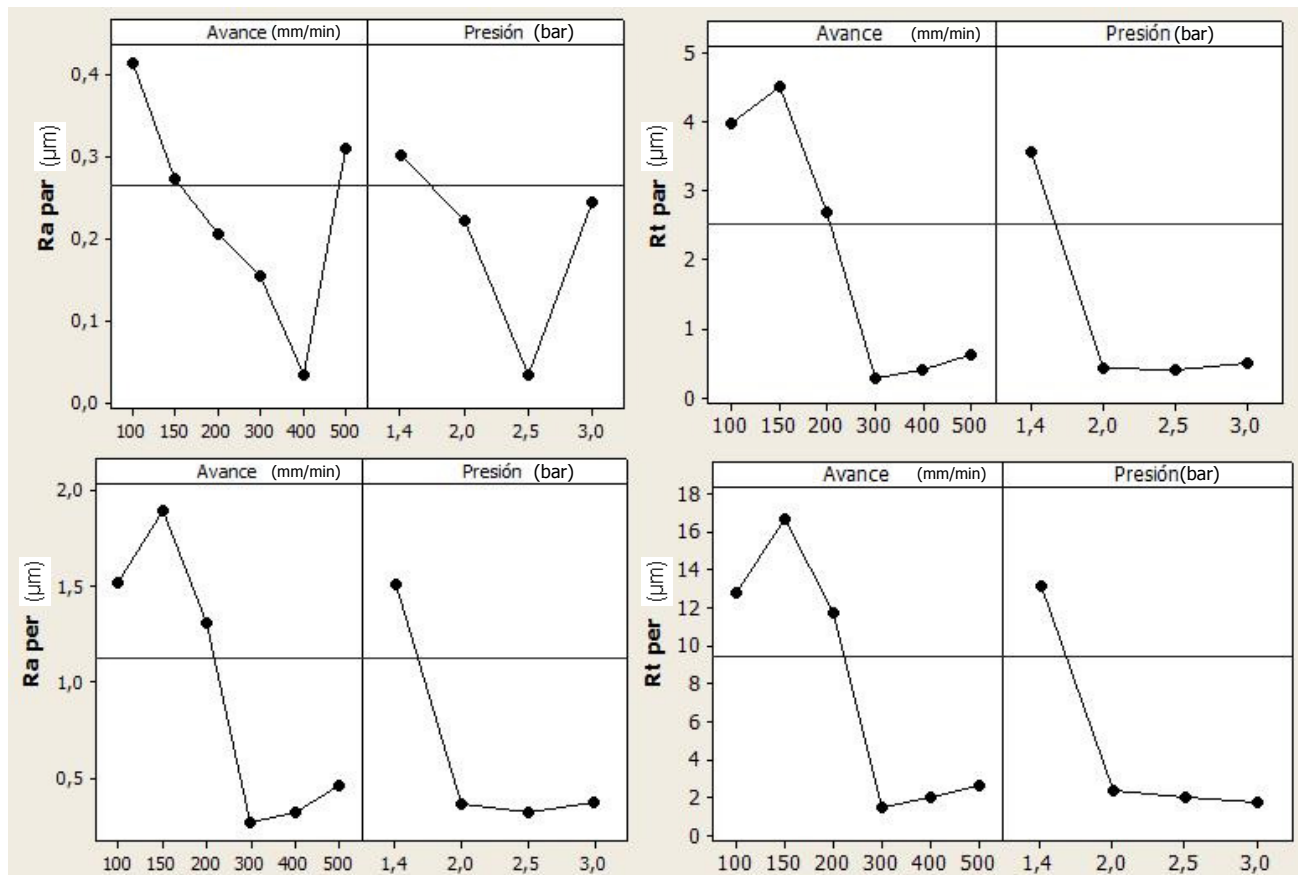


Figura 5.22. Gráfico resumen de los experimentos sobre probetas planas de Aluminio A96351

Del gráfico resumen anterior se puede concluir cuales son los valores de los parámetros ensayados con los que se pueden obtener los mejores resultados. En cuanto a las velocidades de avance, las óptimas están cercanas a los 300 mm/min. No obstante si se quiere incrementar la productividad del proceso la velocidad de avance se puede aumentar porque respecto al fresado previo incluso para valores de 500 mm/min hay mejorías evidentes. Todo dependerá de los valores de rugosidad que se quieran obtener en cada momento.

La presión por su parte alcanza su valor óptimo en 2,5 bar. En el caso del ancho de la pasada lateral de la herramienta, del experimento 1 se puede concluir que en el orden de 0,08 a 0,15 mm se obtienen valores de rugosidad adecuados, pero para 0,08 mm, se obtienen los más pequeños.

Entre las probetas de ambos experimentos hay diferencias en el valor de las rugosidades dejadas por el mecanizado previo. Este parámetro no ha sido valorado en los experimentos anteriores, pero no obstante se puede observar que en el segundo experimento, donde las rugosidades dejadas por el

fresado previo son mejores, los resultados en porcentaje de mejoría de la rugosidad superficial producto del proceso de bruñido son mejores que en el primer experimento. Este efecto sería necesario comprobarlo, por ello en los experimentos sucesivos la rugosidad superficial que la probeta tiene producto del mecanizado previo será tomado como un parámetro del proceso, del cual se valorará su influencia.

Todos estos resultados han sido obtenidos para el proceso de bruñido del aluminio A96351. Surge entonces la necesidad de comprobar que sucedería durante el proceso de bruñido de otros materiales. Sería necesario poder responder a las siguientes interrogantes:

1. ¿Será adecuado el proceso de bruñido para mejorar el acabado superficial de piezas fabricadas de otros tipos de materiales metálicos?
2. ¿Los resultados serán los mismos o habrá algún cambio significativo?
3. ¿La influencia de los parámetros del sistema será la misma?

Para responder a las interrogantes anteriores se han realizado otros dos experimentos con sendos materiales diferentes.

5.3. Tercer experimento. Estudio del proceso de bruñido en piezas planas de aluminio A92017

Se ha realizado un tercer experimento donde se utilizan probetas elaboradas de otro material, en este caso aluminio A92017 (figura 5.23). Se trata de comprobar si los resultados extraídos en los casos anteriores se cumplen para otros tipos de materiales y a la vez probar la influencia de otros parámetros sobre el proceso de bruñido.

En estas probetas se realiza un planeado con tres condiciones diferentes. Esto hace que en la cara a bruñir de las probetas hayan 3 zonas diferentes, donde la diferencia entre ellas está en la altura de las crestas resultantes de la operación de planeado. Se ha utilizado para ello una fresa esférica de radio 20 mm, trabajando a 16000 rpm, con una profundidad de corte de 0,5 mm y con un avance que es el resultante de calcular las alturas de cresta que deben quedar en cada zona (0,02; 0,06 y 0,10 mm, respectivamente).



Figura 5.23. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir

En este experimento se evaluará también como actúa la calidad superficial previa sobre la calidad superficial después del bruñido. Este parámetro no había sido considerado en los experimentos anteriores, con lo cual también es objetivo de este experimento comprobar dicha influencia. Las otras variables del sistema son la velocidad de avance de la herramienta y la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta, que como se ha visto en los experimentos anteriores son los parámetros que tienen más influencia sobre la rugosidad medida después del bruñido. La importancia de estos parámetros también se evidencia en el modelo físico planteado en el capítulo 4.

La combinación de los parámetros da como resultado un diseño experimental 2^3 , es decir 8 combinaciones, con dos iteraciones y 4 puntos centrales, lo cual hace un total de 20 experimentos diferentes. Los valores que toman estas variables, así como los resultados obtenidos, se pueden observar en la tabla 5.13.

No. Exp.	h (mm)	a (mm/min)	t (mm)	Ra par. (μ m)	Rt par. (μ m)	Ra per. (μ m)	Rt per. (μ m)
1	0,02	300	1,00	0,1090	1,2946	0,1603	1,2741
2	0,10	300	1,00	0,2012	1,9876	1,4160	7,6634
3	0,02	1000	1,00	0,0699	0,9628	0,1700	1,8615
4	0,10	1000	1,00	0,0671	0,6357	1,4023	6,9901
5	0,02	300	1,50	0,0865	1,1019	0,1324	1,4962
6	0,10	300	1,50	0,0657	1,8450	1,3923	6,5818
7	0,02	1000	1,50	0,0721	1,6631	0,1462	1,6305
8	0,10	1000	1,50	0,0339	0,3030	1,3688	6,5155
9	0,02	300	1,00	0,0740	1,3994	0,1878	1,6738
10	0,10	300	1,00	0,2067	1,0038	1,4301	7,6479
11	0,02	1000	1,00	0,0573	0,8830	0,1776	2,0240
12	0,10	1000	1,00	0,0523	0,4285	1,4061	6,8821
13	0,02	300	1,50	0,0949	1,0048	0,1345	1,5435
14	0,10	300	1,50	0,0615	1,1980	1,3939	7,4997
15	0,02	1000	1,50	0,0623	1,2832	0,1514	1,0269
16	0,10	1000	1,50	0,0345	0,2839	1,3794	6,5561
17	0,06	650	1,25	0,0428	0,6087	1,1918	6,3309
18	0,06	650	1,25	0,0563	0,4496	1,2162	5,9321
19	0,06	650	1,25	0,0882	0,7245	1,2306	5,9328
20	0,06	650	1,25	0,0835	1,1337	1,2616	5,8218
Fresado 1	0,02			0,2495	2,2158	0,6095	4,1082
Fresado 2	0,06			0,2086	1,2288	1,2716	10,6723
Fresado 3	0,1			0,3676	4,5687	1,6623	14,4031

Tabla 5.13. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados

Donde:

h - Altura de Cresta.

El resto de los parámetros han quedado definidos en los apartados anteriores

5.3.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial

En la tabla de resultados (tabla 5.13), se puede observar como en los experimentos anteriores, que el valor de la rugosidad superficial media disminuye respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo. En la zona 1 donde la altura de cresta previa era de 0,02 μ m, Ra disminuye en aproximadamente un 66 % en las medidas tomadas paralelas al avance y un 74 % en las tomadas perpendicularmente. Para Rt las disminuciones son de un 43 y un 63 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente. En la zona 2 donde la altura de cresta previa era de 0,06 μ m, Ra disminuye en aproximadamente un 79 % en las medidas tomadas paralelas al avance y un 4 % en las tomadas perpendicularmente. Para Rt las disminuciones son de un 36 y un 43 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente y por último en la zona 3 donde la altura de cresta previa era de 0,1 μ m, Ra

disminuye en aproximadamente un 68 % en las medidas tomadas paralelas al avance y un 75 % en las tomadas perpendicularmente. Para R_t las disminuciones son de un 16 y un 51 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente.

En este caso también se han medido dos indicadores de rugosidad superficial: R_a y R_t . Y ambos en la dirección del avance de la herramienta (R_a par. y R_t par.) y en la dirección perpendicular a éste (R_a per. y R_t per.). Se obtendrán 4 expresiones como (3), correspondientes cada una de ellas a cada valor medido.

$$R_x = \text{Constante} + C1h + C2a + C3t + C4ha + C5ht + C6at + C7hat \quad (3)$$

Siendo el sufijo x a o t según sea el caso, resultando R_x ser R_a o R_t

En el caso de R_a medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 90,08%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.14.

Término	Coefficiente
Constante	-0,0251929
C1	6,70107
C2	$6,80179 * 10^{-5}$
C3	0,0880714
C4	-0,00602232
C5	-4,67214
C6	$-6,63214 * 10^{-5}$
C7	0,00394464

Tabla 5.14. Coeficientes de la curva de regresión para R_a par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.24 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

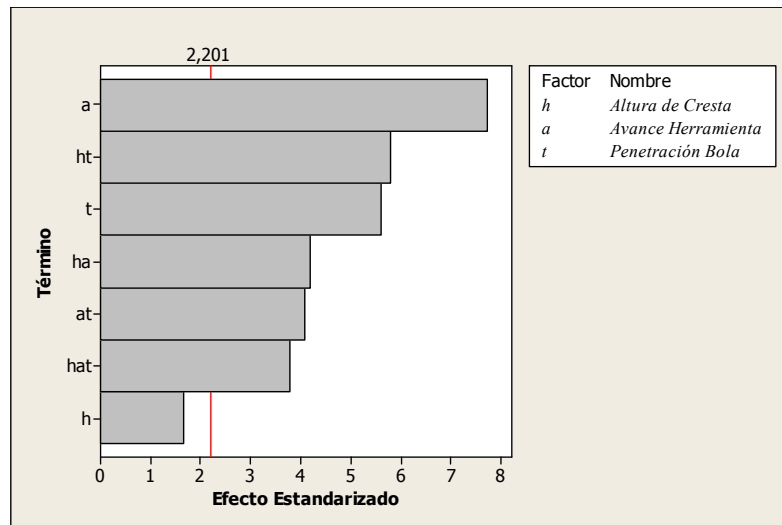


Figura 5.24. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La velocidad de avance de la herramienta, la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta y la combinación de los parámetros, son los aspectos que más inciden sobre los valores de Ra en el caso de este material. La altura de cresta previa no ejerce mucha influencia sobre este indicador. El comportamiento de la velocidad de avance es similar al que tienen en los experimentos anteriores, sin embargo en este caso la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta, toma protagonismo. Esto podría ser por que en este experimento, este parámetro toma valores de entre 1,0 y 1,5 mm, sin embargo en el primer experimento, donde también se valoraba como parámetro, tomaba valores de entre 0,5 y 1,0 mm. Si se busca la explicación en el modelo físico del capítulo anterior, t ejerce influencia sobre los valores del salto, con lo cual, si sus valores son adecuados para el material de la pieza a bruñir, sus variaciones deben ser significativas en los resultados del proceso. De esta manera, como se evidencia en este experimento, al aumentar los valores de t , éste se vuelve un parámetro significativo.

En el gráfico de la figura 5.25 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de Ra resultantes.

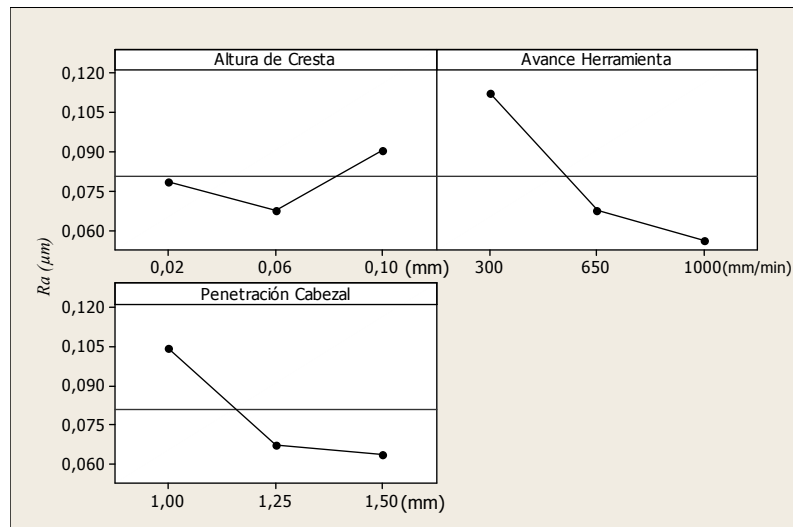


Figura 5.25. Efectos sobre R_a de las variables del proceso

Se puede observar claramente que los valores de R_a disminuyen cuando aumenta la velocidad de avance y cuando aumenta la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta. Este comportamiento es bastante similar al que se observa para el aluminio A96351. En cuanto a la altura de cresta previa el comportamiento es no lineal.

En el caso de R_t medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un $R-Sq(adj) = 59,67\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.15.

Término	Coeficiente
Constante	3,14165
C1	-15,1125
C2	-0,003616
C3	-1,70787
C4	0,02995
C5	19,8614
C6	0,00320282
C7	-0,0395839

Tabla 5.15. Coeficientes de la curva de regresión para R_t par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.26 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

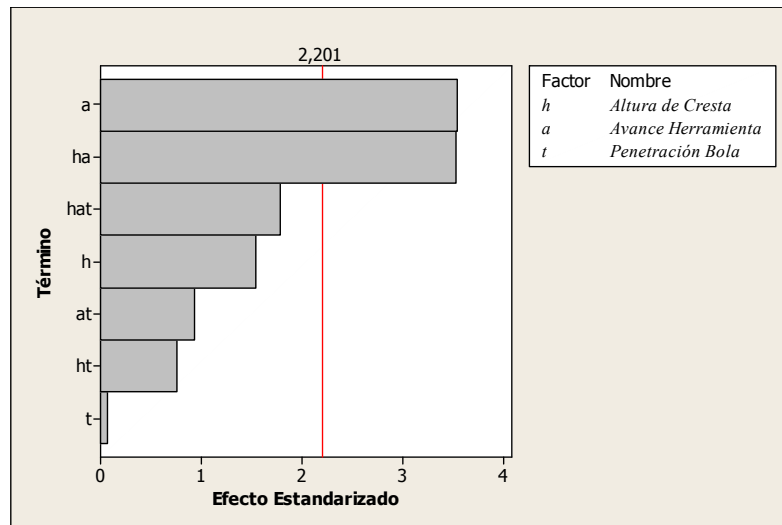


Figura 5.26. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La velocidad de avance de la herramienta, continúa siendo el parámetro más significativo al igual que para el caso de las medidas de R_a . La penetración del cabezal de la herramienta no es significativa, como tampoco lo es la altura de cresta previa. Sin embargo la combinación de velocidad de avance y la altura de cresta previa si es significativa, lo cual significa que la altura de cresta si que ejerce una cierta influencia. Esta combinación de parámetros es significativa en el caso de los dos indicadores medidos en la dirección paralela al avance del fresado previo. Si se busca la explicación en el modelo físico, la altura de cresta previa influye sobre el salto e , pero no es el único factor que determina su valor.

La penetración del cabezal de la herramienta se puede eliminar de la curva de regresión para poder realizar un mejor análisis de los resultados.

En el nuevo análisis y para un $R\text{-Sq(adj)} = 57,93\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.16.

Término	Coeficiente
Constante	1,00681
C1	9,71429
C2	0,000387527
C3	0
C4	-0,0195299
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.16. Coeficientes de la curva de regresión para R_t par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.27 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

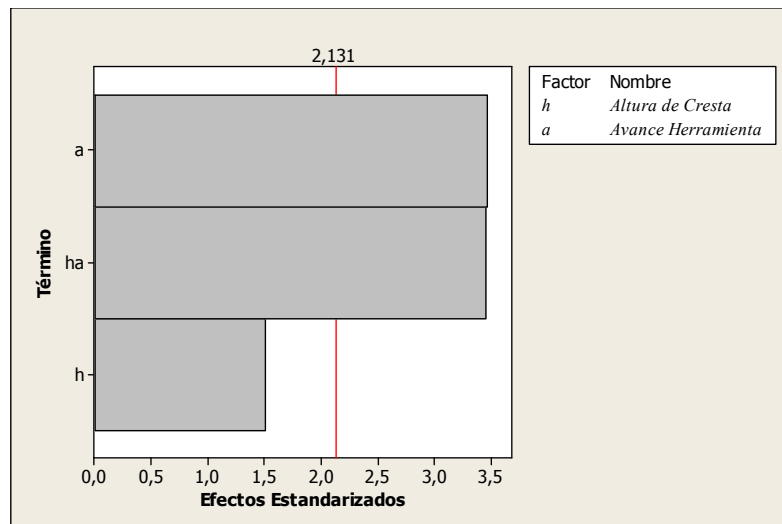


Figura 5.27. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.28 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro significativo sobre los valores de R_t resultantes.

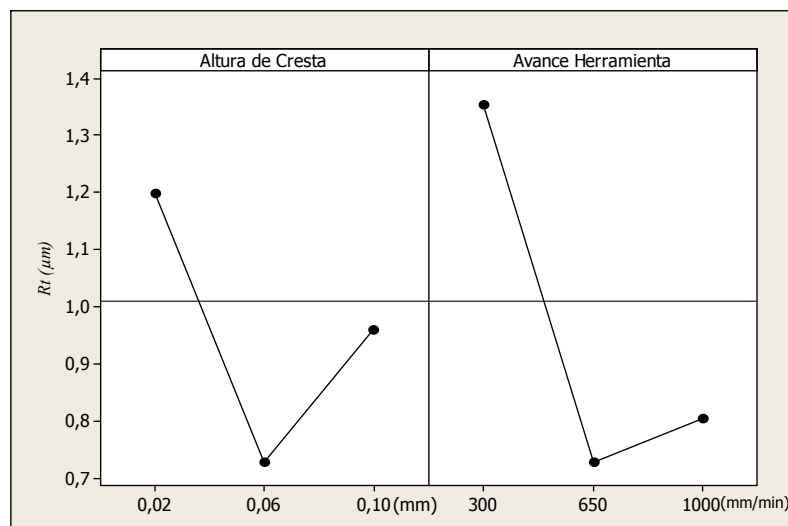


Figura 5.28. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Los mejores valores para R_t par. se encuentran cuando la altura de cresta previa tiene su valor medio. Lo mismo sucede para la velocidad de avance. Hay que tener en cuenta que en este análisis el **R-Sq(adj)** no tiene un valor alto.

En el caso de Ra medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un $R-Sq(adj) = 99,92\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.17.

Término	Coeficiente
Constante	-0,0368143
C1	15,2771
C2	$-4,95357 * 10^{-5}$
C3	-0,103271
C4	0,00023036
C5	0,435
C6	$5,58214 * 10^{-5}$
C7	-0,0005625

Tabla 5.17. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.29 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

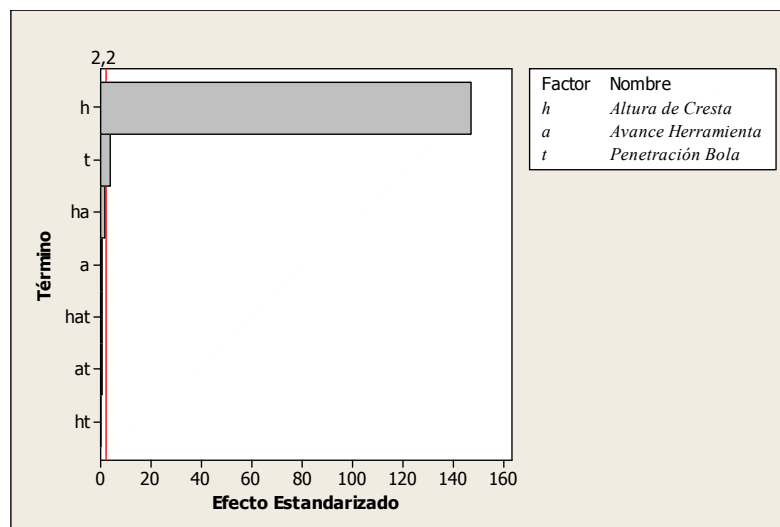


Figura 5.29. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para Ra medida en la dirección perpendicular al avance, como era de esperar, la altura de cresta previa es el parámetro más significativo con diferencia respecto a los otros, aunque la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta también ejerce cierta influencia en los valores de Ra . Este resultado confirma que estos dos parámetros definen el perfil de la superficie, cuando éste se analiza en el sentido perpendicular al avance del fresado previo. Sin embargo como ya pasaba en el primer experimento, en esta dirección la velocidad de avance no ejerce ninguna influencia producto de que

la bola no avanza en esta dirección. Se eliminan los parámetros no significativos y se vuelve a realizar el análisis.

En el nuevo análisis y para un **R-Sq(adj) = 99,93%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.18.

Término	Coeficiente
Constante	-0,0742156
C1	15,5136
C2	0
C3	-0,0628250
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.18. Coeficientes de la curva de regresión para R_a per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.30 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

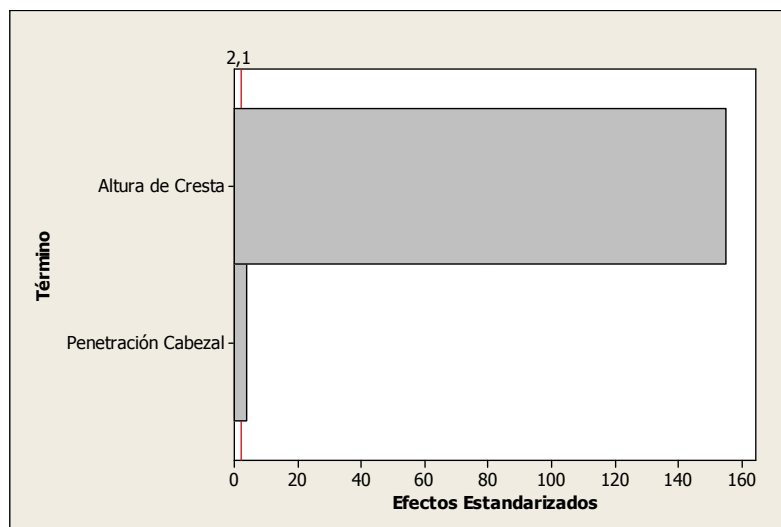


Figura 5.30. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.31 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_a resultantes.

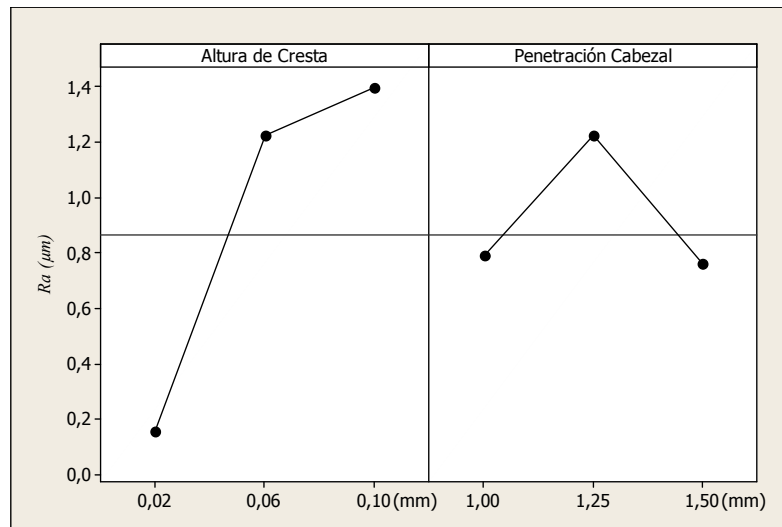


Figura 5.31. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

Ra toma valores más pequeños cuando la altura de cresta de la superficie fresada previa es más pequeña (comportamiento totalmente coherente). Ra respecto a la profundidad de penetración del cabezal y el avance de la herramienta, no tiene un comportamiento lineal.

En el caso de Rt medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 98,88%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.19.

Término	Coeficiente
Constante	-1,57499
C1	109,528
C2	0,00360437
C3	1,17527
C4	-0,0524545
C5	-25,8902
C6	-0,00251025
C7	0,0312339

Tabla 5.19. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.32 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

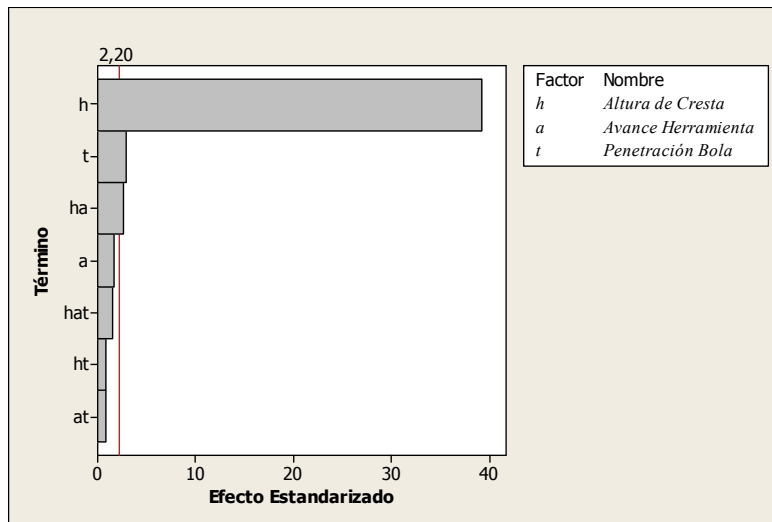


Figura 5.32. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La influencia de los parámetros sobre R_t es similar a la que ejercen sobre R_a medidos en esta dirección (perpendicular al avance de la herramienta de fresado). Al igual que en el caso anterior, se eliminan los parámetros no significativos y se vuelve a realizar el análisis.

En el nuevo análisis y para un **R-Sq(adj) = 98,26%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.20.

Término	Coeficiente
Constante	1,18697
C1	68,4470
C2	0
C3	-0,791675
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.20. Coeficientes de la curva de regresión para R_t per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.33 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

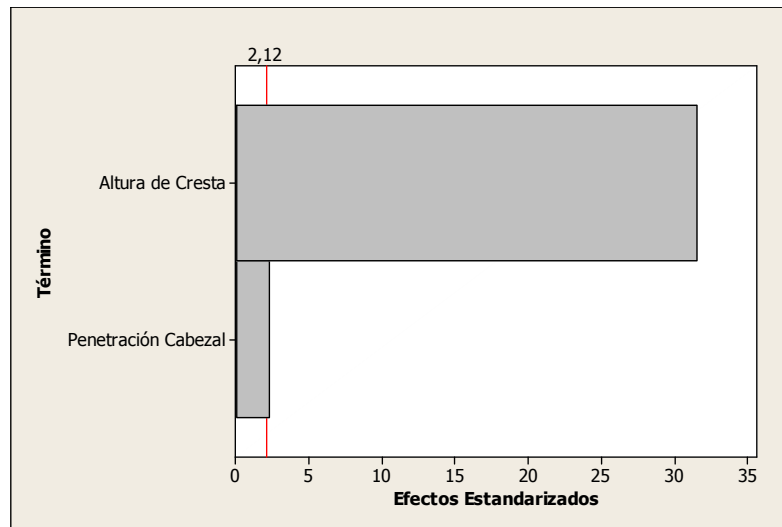


Figura 5.33. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.34 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_t resultantes.

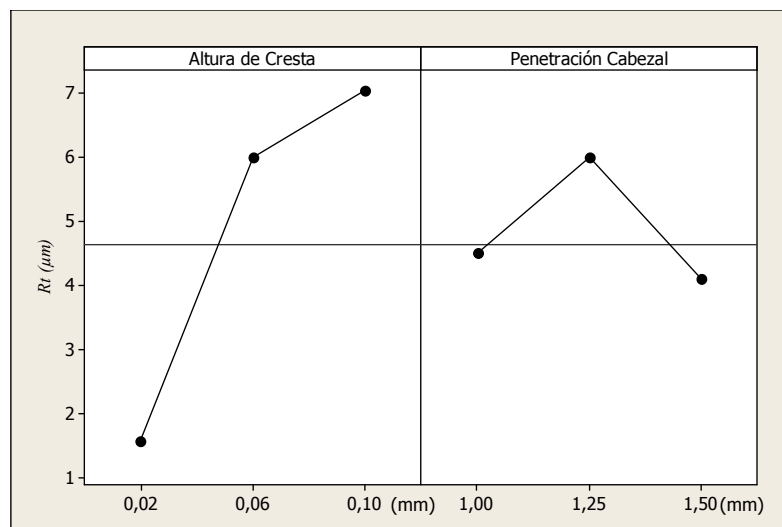


Figura 5.34. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias son similares a las que tienen los mismos parámetros para R_a per..

5.3.2. Comentarios sobre los resultados del experimento

En el aluminio A92017 el proceso de bruñido también contribuye a mejorar la rugosidad superficial de las piezas ensayadas.

La fuerza que ejerce la herramienta sobre el material de la pieza para deformarla (variada en este experimento por la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta) es el parámetro que aparece como significativo para la mayoría de los indicadores de rugosidad medidos, excepto para *Rt par.*.

Por su parte la altura de cresta previamente dejada por el fresado, también ejerce influencia sobre todo para los indicadores medidos en el sentido perpendicular al avance. Esto era de esperar ya que el bruñido mejora en un cierto porcentaje la rugosidad superficial, pero ese porcentaje es a partir de una rugosidad previa, que si es más basta se mejorará en cierta medida, pero si es más fina también se mejorará en una medida similar. Esta altura de cresta es la que define la forma del perfil en el sentido perpendicular al avance del fresado previo, con lo cual es en esta dirección en la que este parámetro es significativo.

La velocidad de avance solamente ejerce influencia sobre el indicador *Ra par.*. Sus valores se han tomado entre los 300 y 1000 mm/min. Se puede observar que cercanos a 300 mm/min los valores de rugosidad medidos son más pequeños, como en los dos experimentos anteriores. Sin embargo en este experimento también se denota que cuando aumentan mucho las velocidades de avance (cerca de 1000 mm/min), también vuelve a haber una mejoría de los valores de rugosidad. Esto quiere decir que su influencia no tiene un comportamiento lineal. Este parámetro pierde el protagonismo que tenía en el aluminio A96351. Esto sucede porque en el aluminio A92017, tiene un coeficiente de auto-endurecimiento menor que el aluminio A96351 y este es función de la tasa de velocidad de deformación, que a su vez es función del avance, como ha sido demostrado en el capítulo anterior.

Como se puede observar en este material también es conveniente utilizar el proceso de bruñido para mejorar el acabado superficial. Los resultados son similares a los obtenidos para el aluminio A96351, con algunos cambios producto de la naturaleza del nuevo material ensayado (aluminio A92017), lo cual hace que la influencia de los parámetros del sistema cambie. Por ejemplo la velocidad de avance no influye de la misma manera en ambos materiales, producto de que no tienen el mismo coeficiente de auto-endurecimiento.

Para entender mejor los comentarios hechos sobre los dos materiales ensayados hasta el momento se pueden observar el gráfico resumen de la figura 5.35.

Hasta aquí quedan respondidas, de alguna manera, las interrogantes planteadas en el epígrafe del experimento anterior (5.2). Hasta el momento han sido evaluados los procesos de bruñido con bola en piezas de aleaciones de base aluminio. Sería interesante entonces, para poder responder con más profundidad a estas interrogantes, realizar otro experimento con otro tipo de aleación que no sea de base aluminio.

Se pasará entonces a realizar un experimento similar al anterior pero esta vez utilizando probetas de acero G10380.

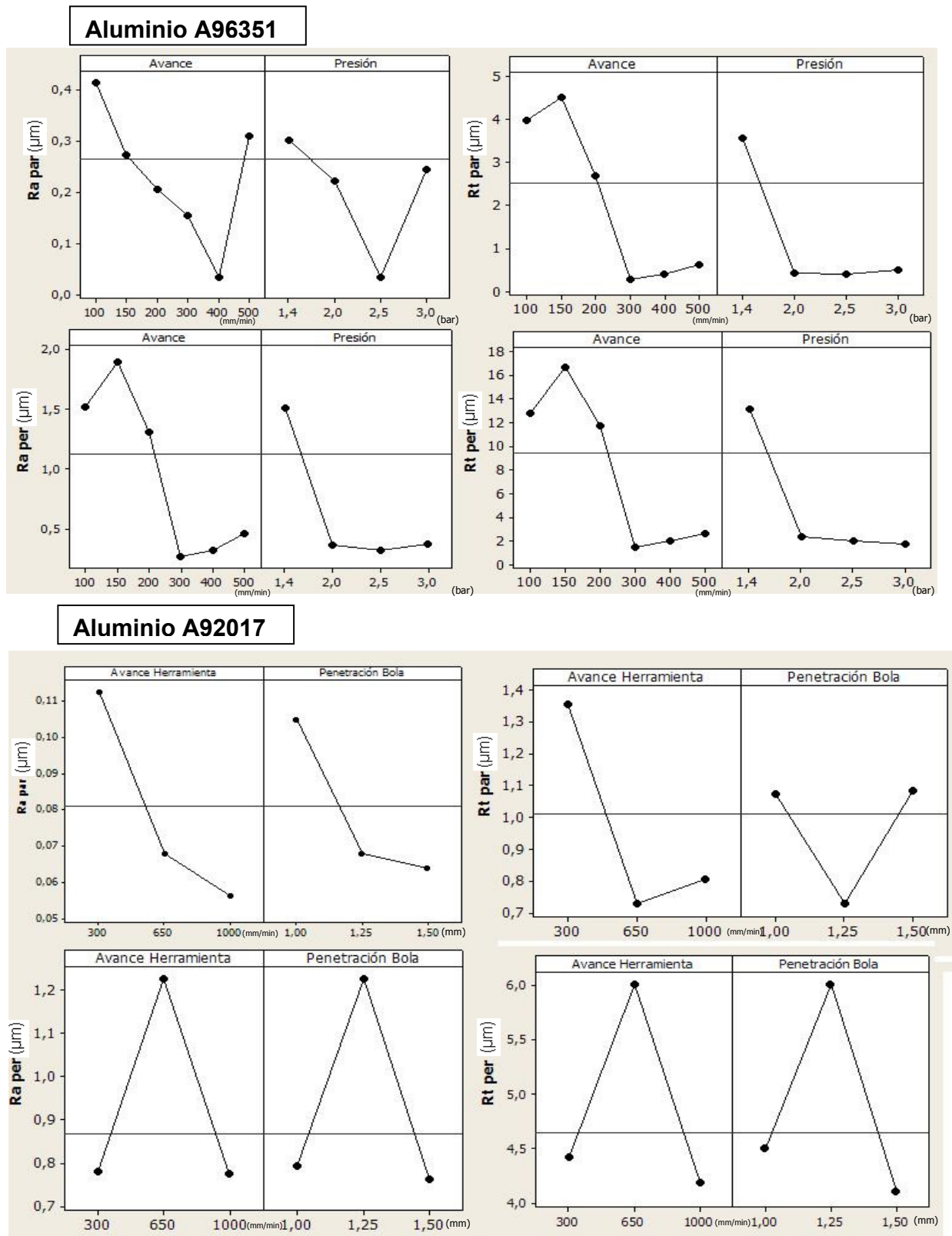


Figura 5.35. Gráfico resumen de los experimentos 1, 2 y 3

5.4. Cuarto experimento. Estudio del proceso de bruñido en piezas planas de Acero G10380

En este caso se ha realizado un experimento similar al anterior. La diferencia está en que las probetas que se utilizan son de acero G10380 (figura 5.36). El objetivo es comprobar las diferencias que hay entre los resultados obtenidos para los dos materiales anteriores (aluminios) y el acero en cuestión. En principio la naturaleza de los materiales es muy diferente y entre otras cosas el coeficiente de auto-endurecimiento de los mismos también difiere bastante. Esto puede ser crucial en los resultados obtenidos.

El proceso de fabricación de las probetas se realiza con un planeado con tres condiciones diferentes, al igual que en el caso anterior. Por tanto hay 3 zonas diferentes, donde la diferencia entre ellas está en la altura de las crestas resultantes de la operación de planeado.

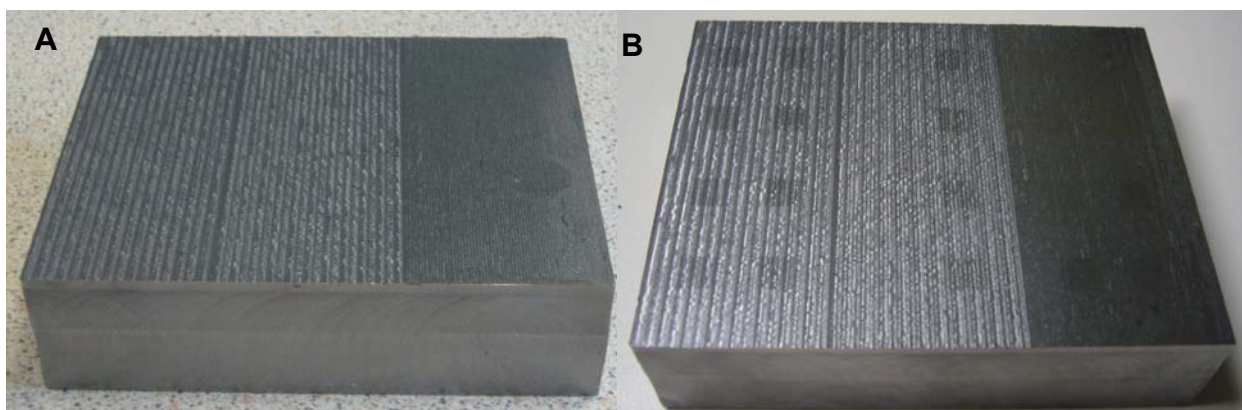


Figura 5.36. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial. A –Antes de bruñir, B- Después de bruñir

Se evalúan también los parámetros: altura de cresta previa, velocidad de avance de la herramienta de bruñido y la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta. Los valores que toman estas variables, así como los resultados obtenidos, se pueden observar en la tabla 5.21.

No. Exp.	h (mm)	a (mm/min)	t (mm)	Ra par. (μm)	Rt par. (μm)	Ra per. (μm)	Rt per. (μm)
1	0,02	300	1,00	0,2361	3,4486	0,2730	2,1519
2	0,10	300	1,00	0,9085	6,8976	2,5814	18,4144
3	0,02	700	1,00	0,1352	3,4321	0,2434	1,6145
4	0,10	700	1,00	0,5506	4,9913	1,9668	15,7240
5	0,02	300	1,50	0,2041	2,5317	0,3242	4,2370
6	0,10	300	1,50	1,3355	9,5835	1,9633	14,4269
7	0,02	700	1,50	0,2128	3,6740	0,2872	2,5695
8	0,10	700	1,50	0,6227	5,6588	2,3023	16,9018
9	0,02	300	1,00	0,1687	2,4212	0,3234	3,9776
10	0,10	300	1,00	0,8375	8,9217	2,0144	14,7902
11	0,02	700	1,00	0,1543	2,8311	0,3006	3,3942
12	0,10	700	1,00	1,0710	8,8368	2,0925	16,3659
13	0,02	300	1,50	0,1386	1,6862	0,2907	2,1235
14	0,10	300	1,50	0,6125	4,0080	2,6024	16,3702
15	0,02	700	1,50	0,1279	2,6062	0,2693	1,9287
16	0,10	700	1,50	0,9521	8,6703	2,2700	15,5851
17	0,06	500	1,25	0,3987	2,9472	2,8832	18,5269
18	0,06	500	1,25	0,3693	5,1646	2,8560	18,6239
19	0,06	500	1,25	0,4166	3,0580	2,2265	16,1563
20	0,06	500	1,25	0,6159	4,6509	3,0538	17,3267
Fresado 1	0,02			0,4515	3,8991	0,6905	4,2043
Fresado 2	0,06			1,5663	12,5042	2,8826	21,8874
Fresado 3	0,1			1,5179	24,2318	2,4374	22,4544

Tabla 5.21. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados

5.4.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial

En la tabla de resultados (tabla 5.21), se puede observar como en los experimentos anteriores, que el valor de la rugosidad superficial media disminuye respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo. En la zona 1 donde la altura de cresta previa era de 0,02 μm, *Ra* disminuye en aproximadamente un 60 % en las medidas tomadas paralelas al avance y un 59 % en las tomadas perpendicularmente. Para *Rt* las disminuciones son de un 31 y un 62 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente. En la zona 2 donde la altura de cresta previa era de 0,06 μm, *Ra* disminuye en aproximadamente un 60 % en las medidas tomadas paralelas al avance y un 23 % en las tomadas perpendicularmente. Para *Rt* las disminuciones son de un 60 y un 21 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente y por último en la zona 3 donde la altura de cresta previa era de 0,1 μm, *Ra* disminuye en aproximadamente un 38 % en las medidas tomadas paralelas al avance y un 19 % en las tomadas perpendicularmente. Para *Rt* las disminuciones son de un 72 y un 27 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente.

Se han medido como en los experimentos anteriores, dos indicadores de rugosidad superficial: Ra y Rt . Y ambos en la dirección del avance de la herramienta ($Ra_{par.}$ y $Rt_{par.}$) y en la dirección perpendicular a éste ($Ra_{per.}$ y $Rt_{per.}$). Se obtendrán 4 curvas de regresión como (3), correspondientes cada una de ellas a cada valor medido.

En el caso de Ra medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un $R-Sq(adj) = 64,90\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.22.

Término	Coefficiente
Constante	0,35813
C1	1,7292
C2	-0,00065084
C3	-0,28099
C4	0,0111734
C5	6,6959
C6	0,00050956
C7	-0,0113156

Tabla 5.22. Coeficientes de la curva de regresión para $Ra_{par.}$

En el diagrama de Pareto de la figura 5.37 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

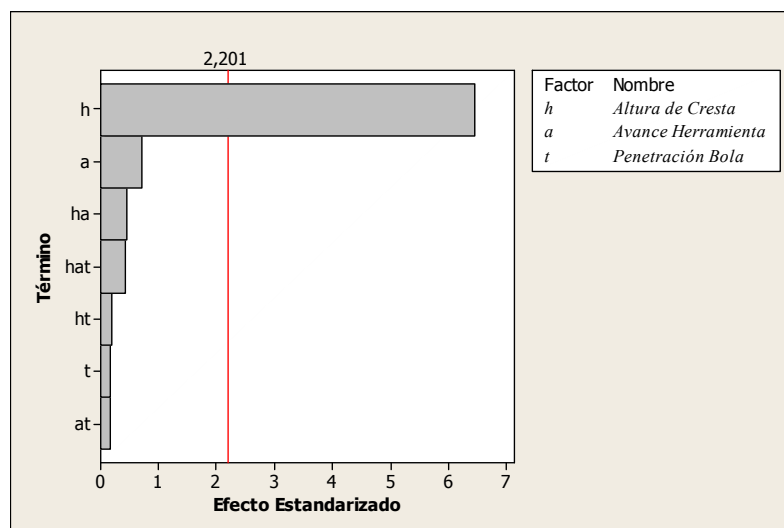


Figura 5.37. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La altura de cresta previa es el parámetro que más afecta a las variaciones de Ra . En este caso la velocidad de avance pierde todo el protagonismo que tenía para el aluminio. Esto sucede porque el

coeficiente de auto-endurecimiento del acero es más bajo que el de cualquier aleación de aluminio. Esto significa que durante el proceso de deformación, el material mantiene un nivel de dureza más o menos constante, con lo cual una variación en la velocidad con la que ocurre el proceso no afecta demasiado los resultados. La profundidad de penetración del cabezal de la herramienta tampoco es un parámetro significativo en este caso. Esto podría ser consecuencia de los valores que toma este parámetro. Para los dos materiales anteriores comenzaba a ser significativo con los valores de entre 1,0 y 1,5 mm. Para el caso del acero G10380, podría ser que estos valores no sean suficientes como para provocar grandes cambios en los resultados del proceso.

Para analizar si el parámetro altura de cresta previa es realmente el más importante se hace un análisis de correlación de los datos. Con un nivel de confianza del 95 % se tratan los datos y dan como resultado lo que se muestra en el gráfico de la figura 5.38.

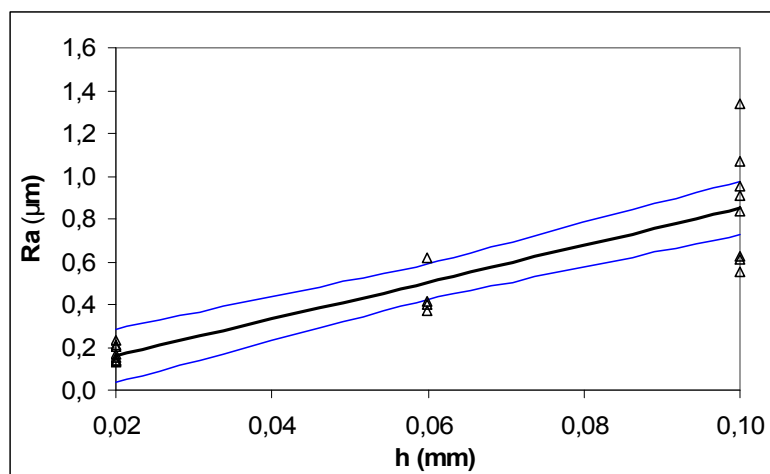


Figura 5.38. Gráfica regresión lineal e Intervalo de confianza para *Ra par*.

Para un **R-Sq = 87,90%** la prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F = 61,1847$ y el $F_2 = 4,41387$. Si $F_1 > F_2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el experimento. De esta manera se puede afirmar para el parámetro que es significativo sobre los valores de *Ra par*. (la altura de cresta previa), existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos.

En este caso los coeficientes de la curva de correlación (4) del modelo reducido se pueden ver en la tabla 5.23.

Término	Coeficiente
Constante	-0,0134
C1	8,6136
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.23. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Ra par.

El intervalo de confianza de los valores obtenidos es para h de $\pm 2,3135$ y para la constante $\pm 0,1616$.

En el gráfico de la figura 5.39 se puede observar la influencia de la variación de la altura de cresta previa sobre los valores de Ra resultantes.

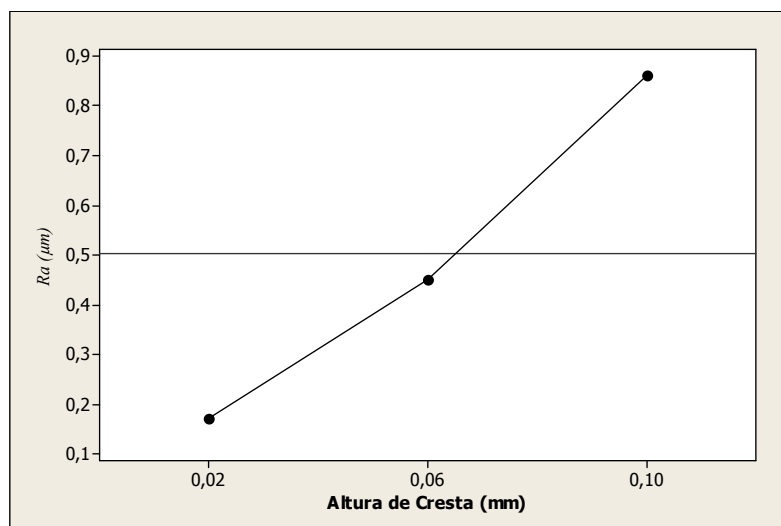


Figura 5.39. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

Se puede observar claramente que los valores de Ra disminuyen cuando la altura de las crestas previas es más pequeña. Este comportamiento es similar al del experimento anterior, solo que en este caso aparece h , como parámetro significativo en este indicador (Ra par.).

En el caso de Rt medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 81,29%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.24.

Término	Coeficiente
Constante	4,63550
C1	52,7725
C2	-0,0007639
C3	-3,76807
C4	-0,145831
C5	43,2247
C6	0,00350981
C7	0,033122

Tabla 5.24. Coeficientes de la curva de regresión para R_t par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.40 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

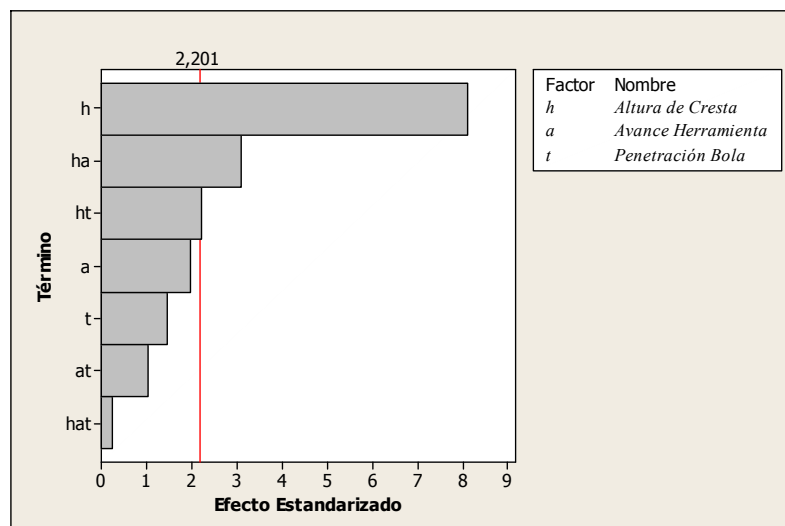


Figura 5.40. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para R_t , es significativa la altura de cresta previa, como para R_a , pero además también lo son las combinaciones de altura de cresta + velocidad de avance y altura de cresta + la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta. Estas dos últimas interacciones parece ser que son significativas ya que h tiene un nivel de importancia relativa muy alta. Para comprobar esta afirmación, como en el caso de R_a par., se realiza un análisis de correlación de los datos para comprobar si el parámetro altura de cresta previa es realmente el más importante. Con un nivel de confianza del 95 % se tratan los datos y dan como resultado lo que se muestra en el gráfico de la figura 5.41.

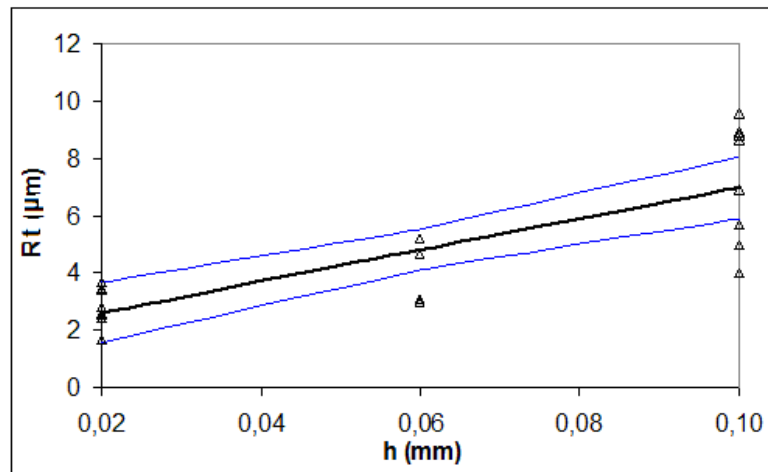


Figura 5.41. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para R_t par.

Para un $R-Sq = 80,49\%$ la prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F = 33,1387$ y el $F_2 = 4,41387$. Si $F_1 > F_2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el experimento. De esta manera se puede afirmar para el parámetro que es significativo sobre los valores de R_t par. (la altura de cresta previa), existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos.

En este caso los coeficientes de la curva de correlación (4) del modelo reducido se pueden ver en la tabla 5.25.

Término	Coefficiente
Constante	1,5257
C1	54,5889
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.25. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para R_a par.

El intervalo de confianza de los valores obtenidos es para h de $\pm 19,9226$ y para la constante $\pm 1,3917$.

En el gráfico de la figura 5.42 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_t resultantes.

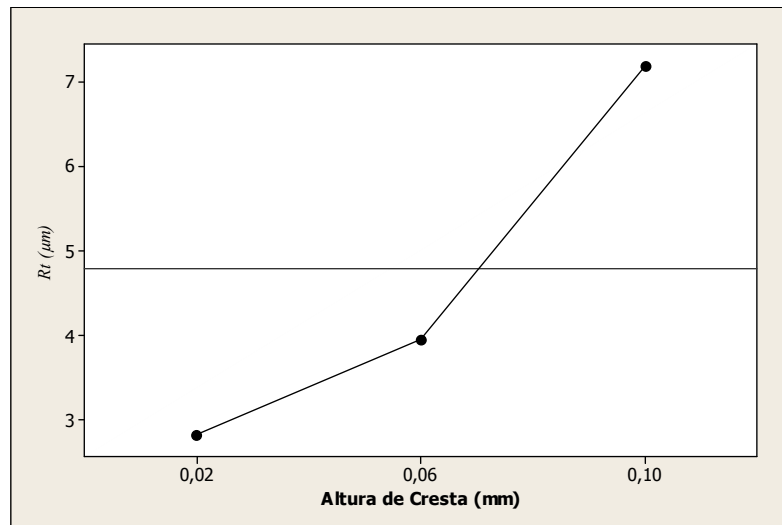


Figura 5.42. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias en este caso son bastante similares a las que se observan para R_a . Los menores valores de R_t se encuentran en la zona de la altura de cresta previa más pequeña. Los otros dos parámetros presentan un comportamiento no lineal.

En el caso de R_a medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 94,21%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.26.

Término	Coefficiente
Constante	-0,36557
C1	33,0208
C2	0,00044397
C3	0,13811
C4	-0,0247234
C5	-5,7553
C6	-0,00035819
C7	0,0171594

Tabla 5.26. Coeficientes de la curva de regresión para R_a per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.43 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

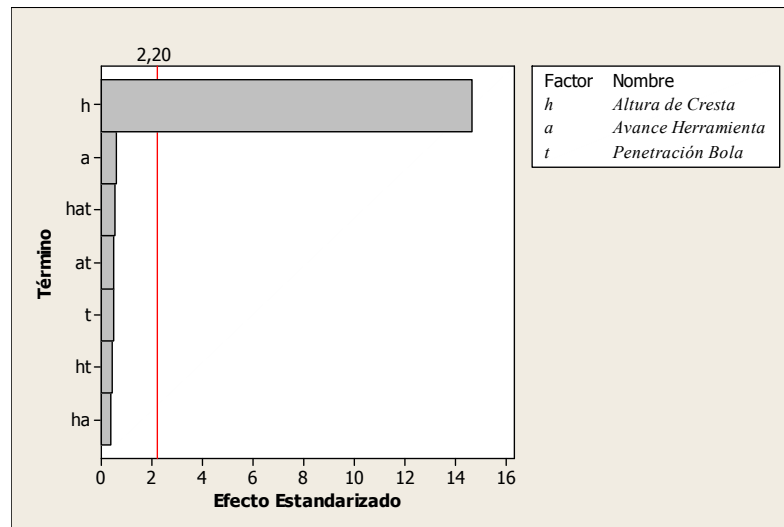


Figura 5.43. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La altura de cresta previa es el parámetro más significativo al igual que para *Ra par.* y *Rt par.*, como era de esperar. Ya se ha comentado anteriormente que este parámetro define la forma del perfil en esta dirección.

Para analizar si el parámetro altura de cresta previa es realmente el más importante se hace un análisis de correlación de los datos. Con un nivel de confianza del 95 % se tratan los datos y dan como resultado lo que se muestra en el gráfico de la figura 5.44.

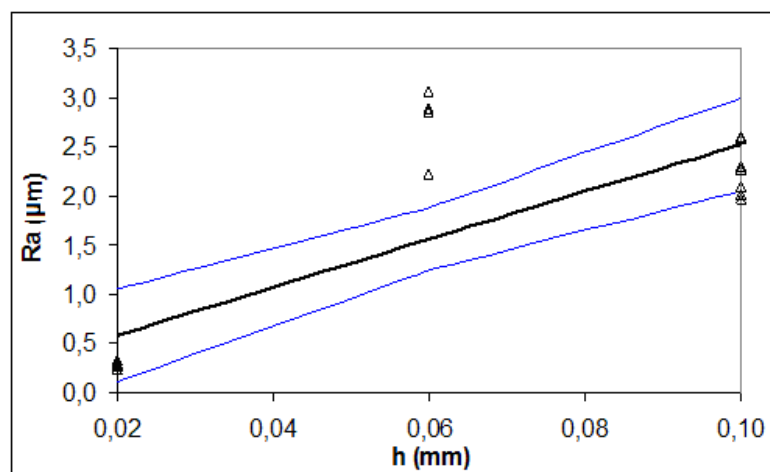


Figura 5.44. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para *Ra per.*

Para un **R-Sq = 80,63%** la prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F = 33,4574$ y el $F_2 = 4,41387$. Si $F_1 > F_2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el

experimento. De esta manera se puede afirmar para el parámetro que es significativo sobre los valores de Ra per. (la altura de cresta previa), existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos.

En este caso los coeficientes de la curva de correlación (4) del modelo reducido se pueden ver en la tabla 5.27.

Término	Coefficiente
Constante	0,1048
C1	24,1895
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.27. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Ra per.

El intervalo de confianza de los valores obtenidos es para h de $\pm 8,786$ y para la constante $\pm 0,6138$.

En el gráfico de la figura 5.45 se puede observar la influencia de la variación de la altura de cresta previa sobre los valores de Ra resultantes.

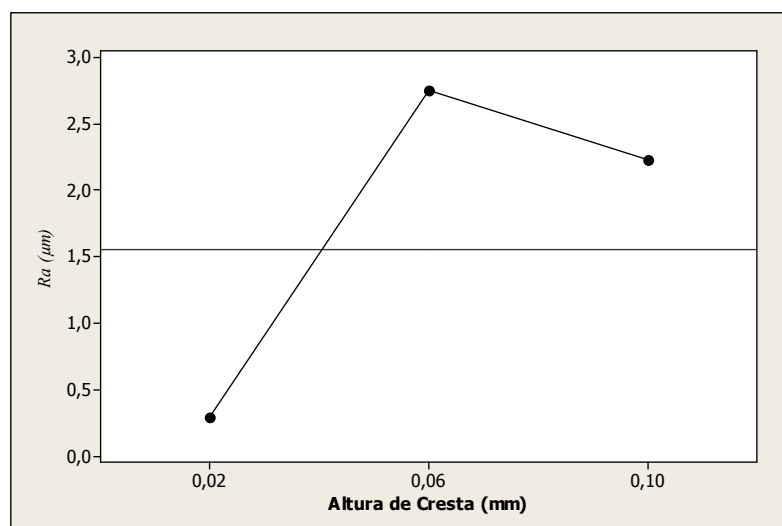


Figura 5.45. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

En el gráfico anterior se puede observar que los puntos intermedios cambian las tendencias de las funciones respecto a las desarrolladas para la rugosidad en el sentido paralelo al avance. También se

puede ver que los menores valores de $Ra_{per.}$ se encuentran en la zona donde la altura de la cresta previa más pequeña.

En el caso de Rt medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un $R-Sq(adj) = 96,49\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.28.

Término	Coeficiente
Constante	-2,01039
C1	235,416
C2	0,0026671
C3	2,11162
C4	-0,110717
C5	-66,2250
C6	-0,0040700
C7	0,110812

Tabla 5.28. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.46 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

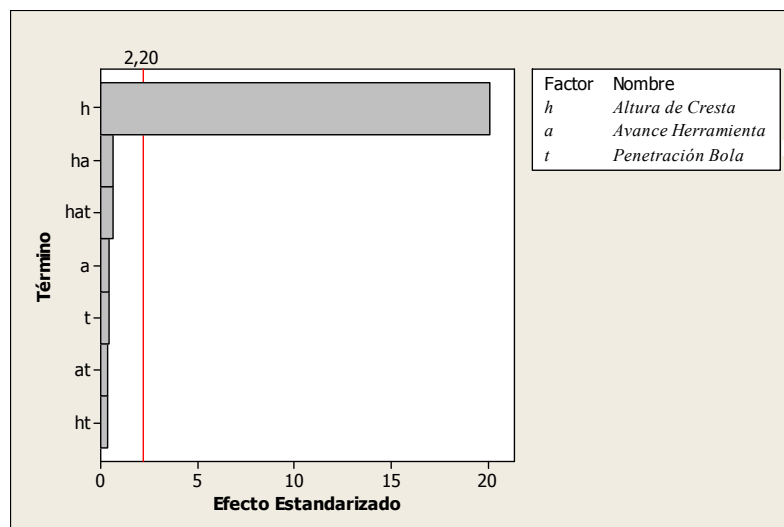


Figura 5.46. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La influencia de los parámetros sobre $Ra_{per.}$ es similar a la que ejercen sobre $Ra_{par.}$. Continúa siendo h , el parámetro más significativo.

Se realizará el mismo análisis de los casos anteriores para demostrar el nivel de correlación entre los datos respecto a la variable significativa. Con un nivel de confianza del 95 % se tratan los datos y dan como resultado lo que se muestra en el gráfico de la figura 5.47.

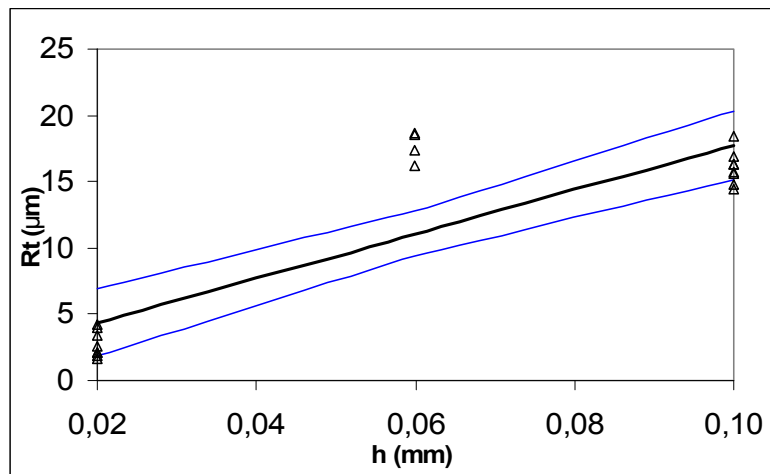


Figura 5.47. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para R_t per.

Para un **R-Sq = 95,41%** la prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F = 182,787$ y el $F_2 = 4,41387$. Si $F_1 > F_2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el experimento. De esta manera se puede afirmar para el parámetro que es significativo sobre los valores de R_t per. (la altura de cresta previa), existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos.

En este caso los coeficientes de la curva de correlación (4) del modelo reducido se pueden ver en la tabla 5.29.

Término	Coeficiente
Constante	0,5374
C1	68,447
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.29. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para R_t per.

El intervalo de confianza de los valores obtenidos es para h de $\pm 10,6363$ y para la constante $\pm 0,743$.

En el gráfico de la figura 5.48 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_t resultantes.

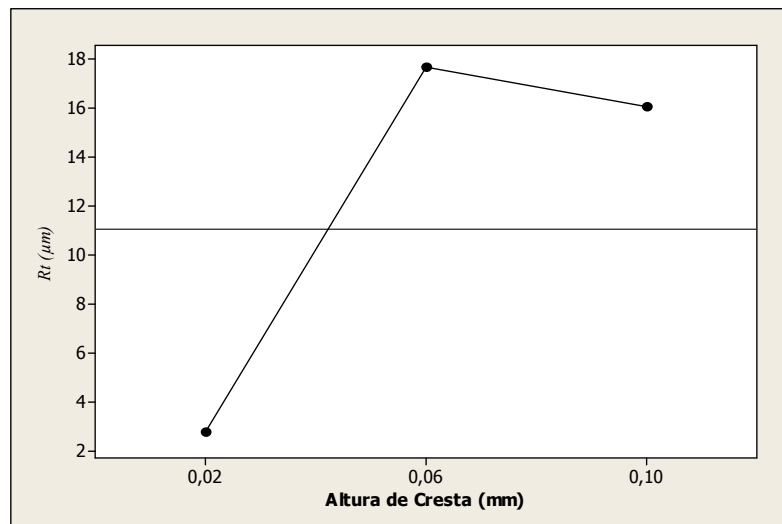


Figura 5.48. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias para este indicador, son similares a las que tienen los mismos parámetros para R_a per..

5.4.2. Comentarios sobre los resultados del experimento

En el Acero G10380 el proceso de bruñido contribuye a mejorar la rugosidad superficial de las piezas ensayadas.

La altura de cresta previamente dejada por el fresado, es el parámetro que más influencia ejerce sobre todos los indicadores de la rugosidad superficial.

La velocidad de avance deja de ser un parámetro significativo. El acero G10380, tiene un coeficiente de auto-endurecimiento más bajo que cualquier aleación de Aluminio, con lo cual es de esperar que la variación de las velocidades de avance no ejerza gran influencia sobre el auto-endurecimiento de éste.

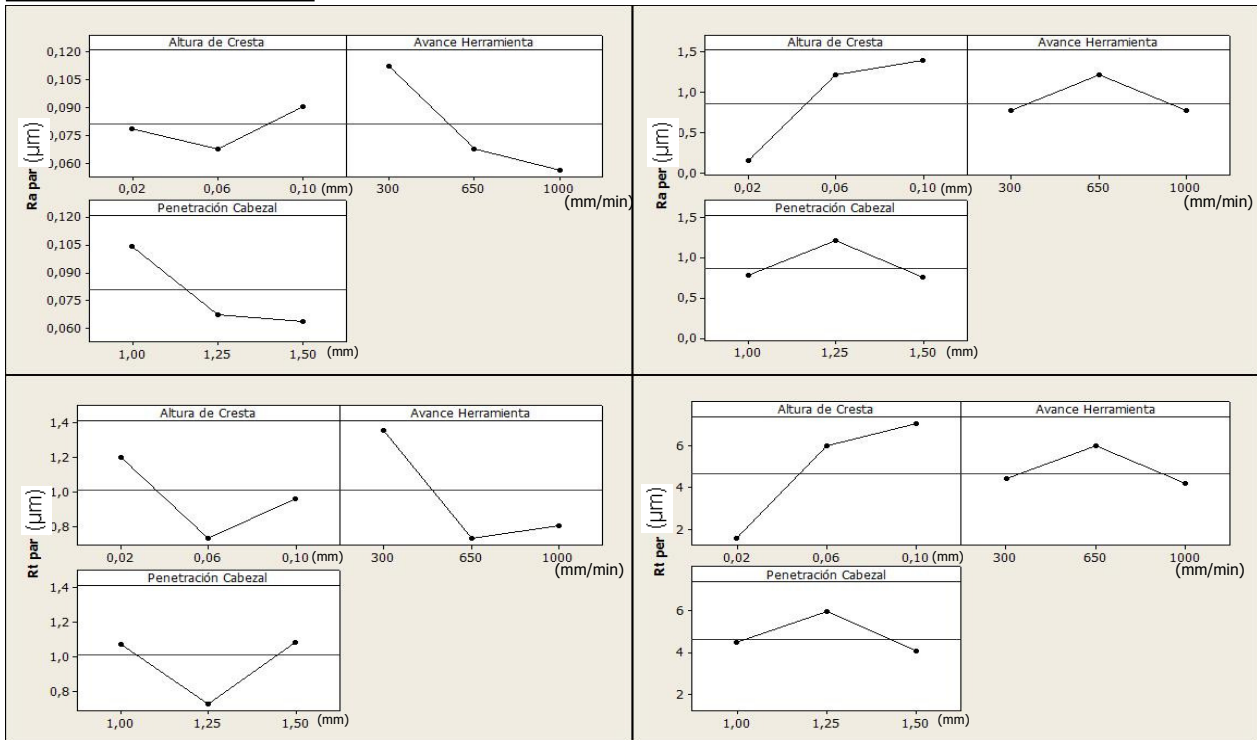
Los valores de los parámetros ensayados con los que se pueden obtener los mejores resultados son: velocidades de avance cercanas a los 300 mm/min para obtener buenos resultados en el sentido paralelo al avance del fresado y cercanos a 500 mm/min para obtener buenos resultados en el

sentido paralelo al fresado; alturas de crestas previas al bruñido pequeñas y profundidades de penetración del cabezal de la herramienta de 1 mm para obtener buenos resultados en el sentido paralelo al fresado y de 1,25 mm para el caso perpendicular.

Como en los casos anteriores si, no obstante, se quiere incrementar la productividad del proceso la velocidad de avance se puede aumentar porque respecto al fresado previo, incluso para valores de 1000 mm/min, hay mejorías evidentes.

Los resultados obtenidos para los experimentos 3 y 4, donde las condiciones de los mismos y las piezas de trabajo son similares, se pueden resumir en el gráfico resumen de la figura 5.49.

Aluminio A92017



Acero G10380

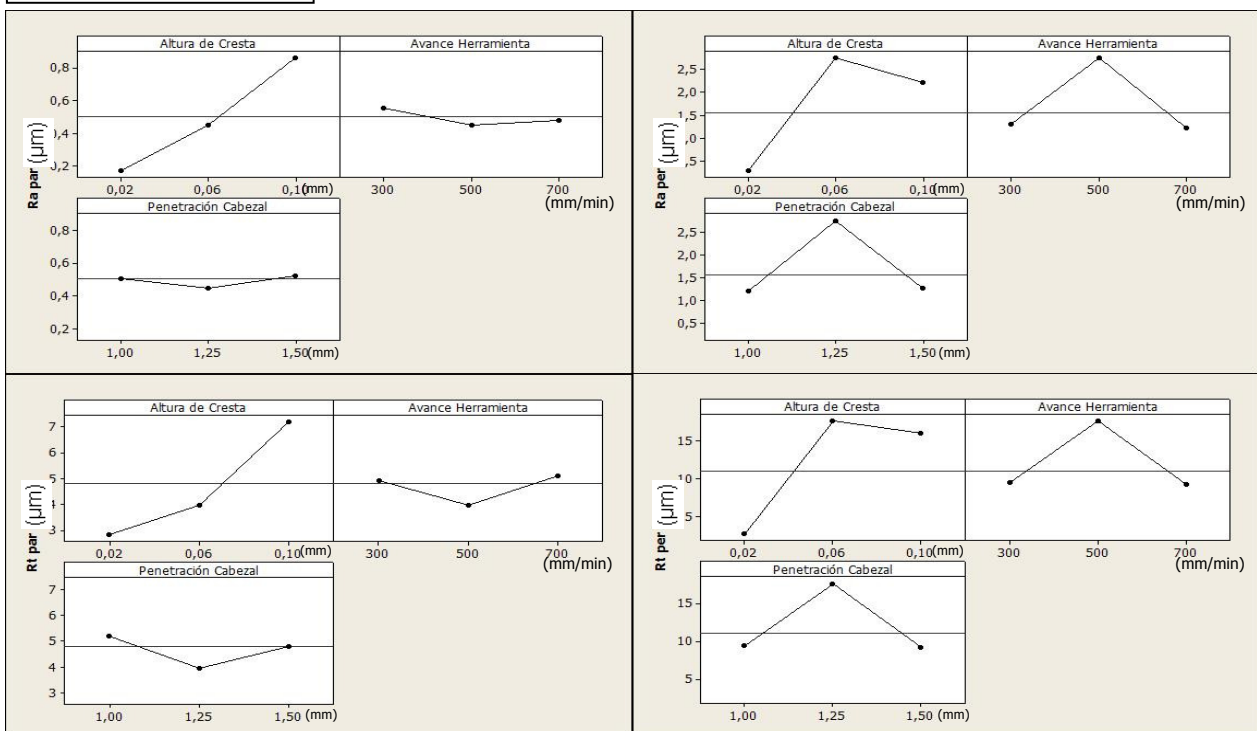


Figura 5.49. Gráfico resumen de los experimentos sobre probetas planas de aluminio A92017 y acero G10380

Teniendo en cuenta los resultados del experimento anterior, se podría decir que el proceso de bruñido con bola es conveniente para mejorar la rugosidad superficial de materiales de diferente naturaleza, como son aleaciones de aluminio y aceros. De esta manera se responde más profundamente a la interrogante planteada en los epígrafes anteriores.

El bruñido con bola es un proceso muy conveniente para elaborar superficies planas como se ha visto anteriormente. Las ventajas ya han sido comentadas, pero la más importante es el hecho de que se puede realizar en la propia máquina herramienta donde ha sido mecanizada la pieza sin necesidad de cambiar de estacada.

Para elaborar una superficie de configuración compleja en la propia máquina herramienta donde se ha mecanizado, el proceso de bruñido con bola podría ser interesante. Además de poder ejecutarse sin cambiar la colocación y el centraje de la pieza, este proceso podría ser conveniente producto de que la herramienta, guiada por el programa de CNC de la máquina, puede ser capaz de describir trayectorias muy complejas. De esta manera mejorar el acabado de una superficie compleja, que normalmente es un problema difícil de solucionar, podría ser muy sencillo.

En los siguientes experimentos se comprobará la veracidad de este planteamiento. Se bruñirán superficies convexas y cóncavas de dos aleaciones diferentes de las ensayadas en los experimentos anteriores.

5.5. Quinto experimento. Estudio de las características del proceso de bruñido en piezas convexas de aluminio A92017

Tras evaluar las características del proceso de bruñido con bola en piezas planas, se ha realizado un experimento donde se utilizan probetas con una superficie convexa fabricadas de aluminio A92017 (figura 5.50). El objetivo de este experimento es evaluar la benevolencia del bruñido con bola en este tipo de superficies, analizando como influyen los parámetros del proceso sobre los resultados del mismo.

La superficie convexa de la pieza a elaborar está compuesta de tres zonas en las que hay tres curvas de radio 50, 100 y 50 mm respectivamente. Estas curvas han sido logradas utilizando fresas esféricas de diferentes diámetros, pero como requisito de partida de cada operación de fresado se ha tomado la altura de cresta resultante constante.

Encima de cada zona fresada entonces se realiza la operación de bruñido. Esta operación se hace a cada vez con tres velocidades de avance diferentes. Es decir en cada zona bruñida se pueden encontrar tres sub-zonas donde la diferencia entre ellas está en los valores de velocidades de avance utilizados.

De esta manera los parámetros o variables del sistema a evaluar en este caso son: el radio de curvatura de la superficie a bruñir, la velocidad de avance de la herramienta de bruñir y la estrategia de mecanizado utilizada que se concreta en cambiar la dirección con la que se hace el bruñido. Esta última se realiza paralela a la dirección del avance del fresado o perpendicular a este.

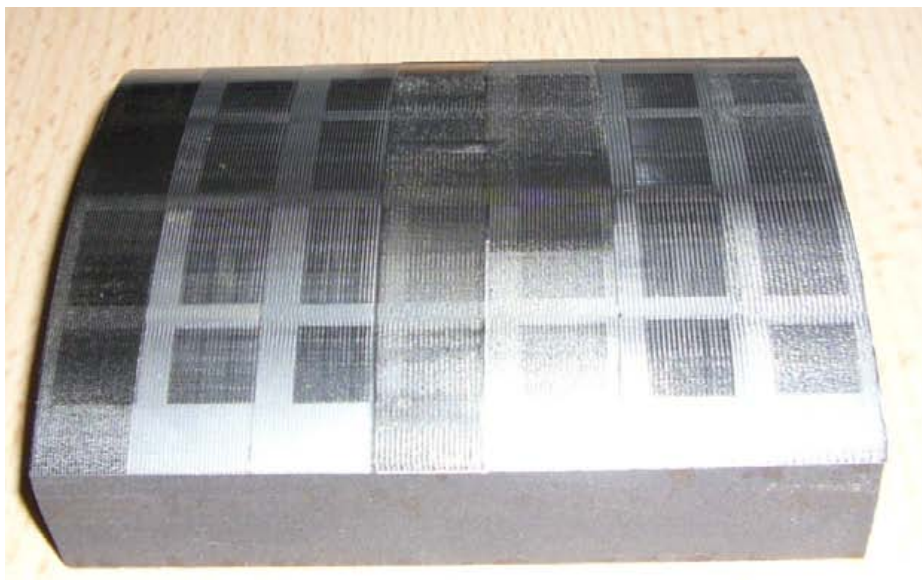


Figura 5.50. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir

Estos parámetros a evaluar dan como resultado un diseño experimental 2^3 , es decir 8 combinaciones, con dos iteraciones, lo cual hace un total de 16 experimentos diferentes. Los valores que toman estas variables, así como los resultados obtenidos, se pueden observar en la tabla 5.30.

No. Exp.	r (mm)	a (mm/min)	D	Ra par. (μ m)	Rt par. (μ m)	Ra per. (μ m)	Rt per. (μ m)
1	50	200	Par	0,0712	1,2291	0,5444	2,4399
2	100	200	Par	0,3441	3,8418	0,3081	1,7671
3	50	500	Par	0,0925	1,1649	0,4573	2,0082
4	100	500	Par	0,1619	2,5495	0,2925	1,5053
5	50	200	Per	0,1353	1,4762	0,3875	2,2829
6	100	200	Per	0,1987	1,8568	1,1473	4,6075
7	50	500	Per	0,1921	1,2336	0,0926	0,7101
8	100	500	Per	0,1933	1,3900	0,1511	0,9595
9	50	200	Par	0,0657	0,7250	0,3549	2,0802
10	100	200	Par	0,3511	4,2815	0,5121	1,9860
11	50	500	Par	0,0658	0,7088	0,3132	1,4091
12	100	500	Par	0,4283	4,2474	0,3698	1,9344
13	50	200	Per	0,1676	1,3173	0,2013	0,9631
14	100	200	Per	0,6284	3,8996	0,4462	3,2392
15	50	500	Per	0,1370	1,0670	0,0796	0,4902
16	100	500	Per	0,3112	4,1647	0,1221	1,1243
Fresado				0,8379	5,2101	1,6741	6,7833

Tabla 5.30. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados

Donde:

r - Radio de curvatura de la superficie

D - Dirección con la que se realiza la operación de bruñido con bola.

Par- Paralela a la dirección del avance del fresado previo.

Per- Perpendicular a la dirección del avance del fresado previo.

El resto de los parámetros ya han sido definidos en los experimentos anteriores.

5.5.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial

En la tabla de resultados (tabla 5.30), se puede observar como en los experimentos anteriores, que el valor de la rugosidad superficial media disminuye respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, en un 59 % en las medidas tomadas paralelas al avance y en un 63 % en las tomadas perpendicularmente. Para Rt las disminuciones son de un 52 % y un 62 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente.

En este caso también se han medido los mismos indicadores de rugosidad superficial: Ra y Rt . Y ambos en la dirección del avance de la herramienta (Ra par. y Rt par.) y en la dirección perpendicular a éste (Ra per. y Rt per.). Se obtendrán 4 curvas de regresión como (4), correspondientes cada una de ellas a cada valor medido.

$$R_x = \text{Constante} + C1r + C2a + C3D + C4ra + C5rD + C6aD + C7raD \quad (4)$$

Siendo el sufijo x a o t según sea el caso, resultando R_x ser R_a o R_t

En el caso de R_a medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 28,38%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5. 31.

Término	Coeficiente
Constante	-0,247808
C1	0,0069965
C2	0,000435667
C3	0,012158
C4	$-7,92 * 10^{-6}$
C5	0,00057083
C6	0,000189333
C7	$-3,70667 * 10^{-6}$

Tabla 5.31. Coeficientes de la curva de regresión para R_a par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.51 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

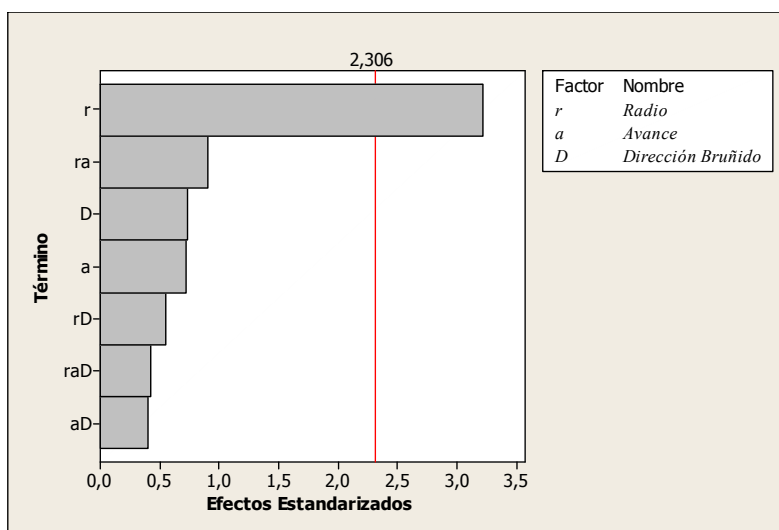


Figura 5.51. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

El radio de curvatura es el parámetro que manda sobre los valores de R_a . El resto de las variables no son significativas. En el modelo físico desarrollado se puede encontrar la explicación a este fenómeno. La fuerza que realiza la herramienta sobre el material es constante, pero a medida que pasa por el perfil, la componente de ésta que actúa en el proceso es diferente. Esto hace que el radio de curvatura sea el parámetro que más haga variar los resultados del proceso.

Por otro lado el **R-Sq(adj)** del experimento tiene un valor muy bajo, lo cual hace pensar que el comportamiento del sistema no es lineal.

Para comprobar si existe correlación entre los valores del parámetro significativo radio de curvatura, se realiza un segundo análisis. Los resultados para un nivel de confianza del 95 %, se muestran en el gráfico de la figura 5.52.

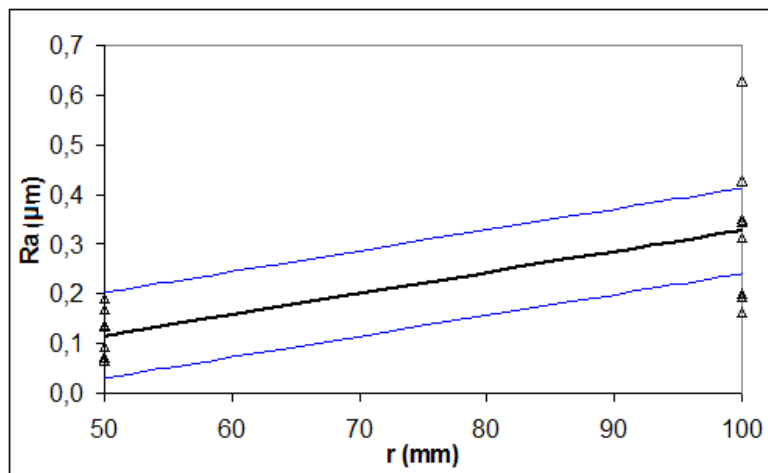


Figura 5.52. Gráfica regresión lineal e Intervalo de confianza para Ra par.

Para un **R-Sq = 70,49%** la prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F = 13,8269$ y el $F_2 = 4,60011$. Si $F_1 > F_2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el experimento. De esta manera se puede afirmar para el parámetro que es significativo sobre los valores de Ra par. (la altura de cresta previa), existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos.

En este caso los coeficientes de la curva de correlación (5) del modelo reducido se pueden ver en la tabla 5.32.

Término	Coeficiente
Constante	-0,0953
C1	0,0042
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.32. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para Ra par.

El intervalo de confianza de los valores obtenidos es para r de $\pm 0,0024$ y para la constante $\pm 0,1926$.

En el gráfico de la figura 5.53 se puede observar la influencia de la variación del radio de curvatura sobre los valores de Ra resultantes.

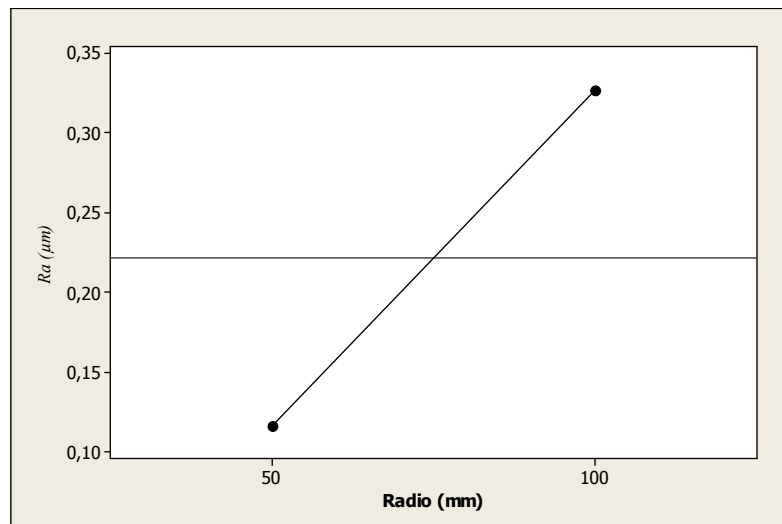


Figura 5.53. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

Cuando aumenta el radio de curvatura de la superficie, aumenta Ra , es decir se pueden lograr mejores valores de Ra en superficies curvas de radio más pequeños, donde las fuerzas que actúan son mayores.

En el caso de Rt medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 49,66%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.33.

Término	Coficiente
Constante	-1,15971
C1	0,0488432
C2	0,00031792
C3	1,33637
C4	$-1,59133 * 10^{-5}$
C5	-0,0211555
C6	-0,00162475
C7	$2,562 * 10^{-5}$

Tabla 5.33. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.54 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

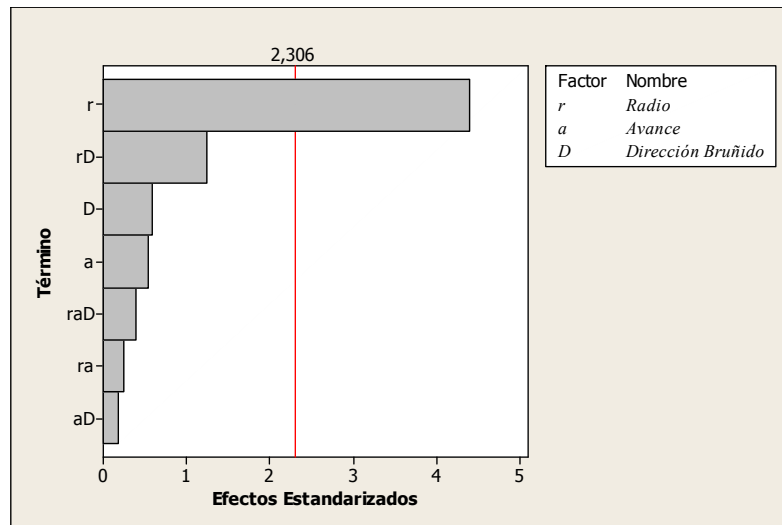


Figura 5.54. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

El radio de curvatura de la pieza sigue siendo el parámetro significativo para estas condiciones, al igual que ha sucedido al analizar las medidas de R_a . El **R-Sq(adj)** ha aumentado un poco, pero su valor sigue siendo bajo.

También se hace necesario hacer la comprobación de si existe correlación entre los valores del parámetro significativo radio de curvatura, se realiza un segundo análisis. Los resultados para un nivel de confianza del 95 %, se muestran en el gráfico de la figura 5.55.

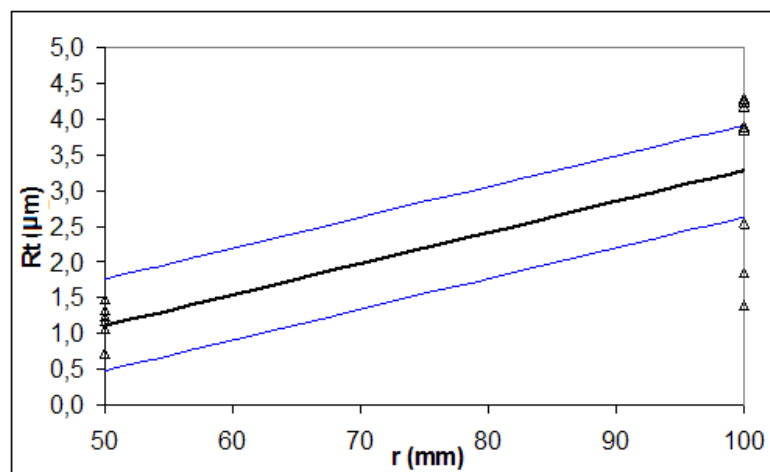


Figura 5.55. Gráfica regresión lineal e Intervalo de confianza para R_t par.

Para un **R-Sq = 80,63%** la prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F = 26,0272$ y el $F_2 = 4,60011$. Si $F_1 > F_2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el

experimento. De esta manera se puede afirmar para el parámetro que es significativo sobre los valores de *Ra par.* (la altura de cresta previa), existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos.

En este caso los coeficientes de la curva de correlación (5) del modelo reducido se pueden ver en la tabla 5.34.

Término	Coeficiente
Constante	-1,0484
C1	0,0433
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.34. Coeficientes de la curva de regresión del modelo reducido para *Rt par.*

El intervalo de confianza de los valores obtenidos es para *r* de $\pm 0,0182$ y para la constante $\pm 1,4382$.

En el gráfico de la figura 5.56 se puede observar la influencia de la variación del radio de curvatura sobre los valores de *Rt* resultantes.

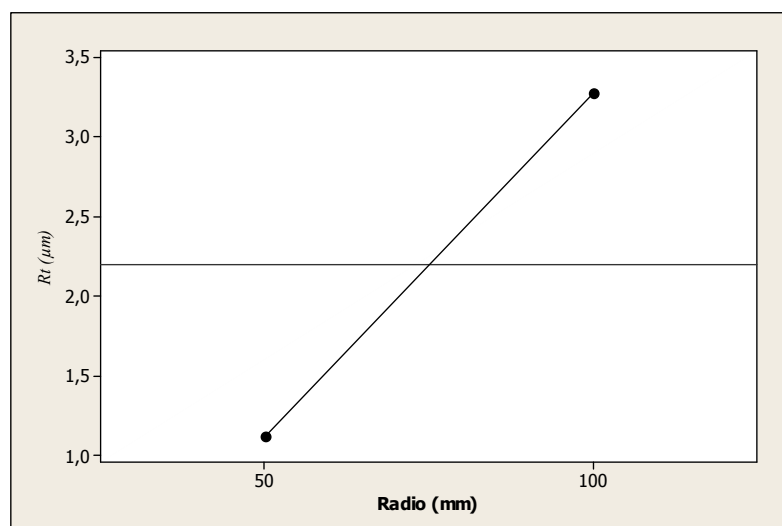


Figura 5.56. Efectos sobre *Rt* de las variables del proceso

Las tendencias en este caso son bastante similares a las que se observan para *Ra*. Los valores de *Rt* son más pequeños en la superficie de radio de curvatura 50 mm.

En el caso de Ra medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 39,57%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.35.

Término	Coeficiente
Constante	0,076058
C1	0,00773733
C2	0,00032283
C3	-0,446375
C4	$-1,55467 * 10^{-5}$
C5	0,00833433
C6	0,000489
C7	$-1,45767 * 10^{-5}$

Tabla 5.35. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.57 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

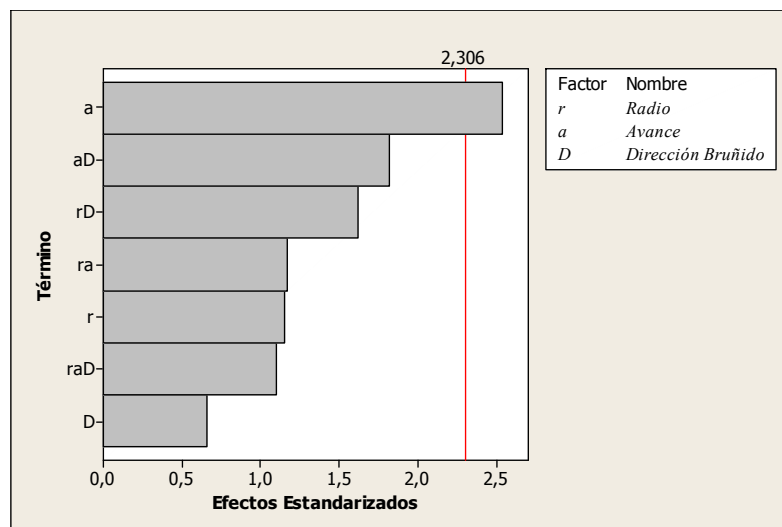


Figura 5.57. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La velocidad de avance de la herramienta vuelve a ganar protagonismo. El radio de curvatura sin embargo no es significativo. Estos resultados son similares al del tercer experimento, donde se evaluó la rugosidad de una superficie plana para este mismo material. Esto sucede ya que la Ra en esta dirección ha sido medida en una línea y no en una curva. Por esta misma razón el radio de curvatura no es un parámetro significativo. El **R-Sq(adj)** sigue teniendo un valor pequeño.

En el gráfico de la figura 5.58 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de Ra resultantes.

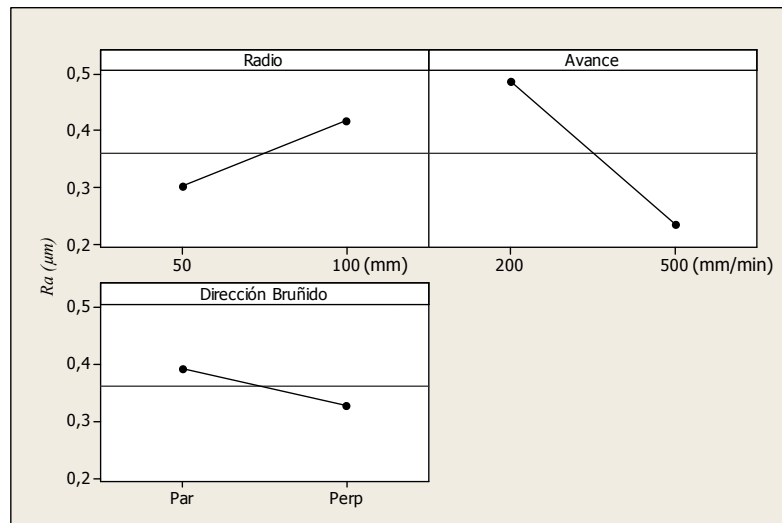


Figura 5.58. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

Ra toma valores más pequeños para velocidades de avance mayores y en la superficie del radio más pequeño. La dirección del bruñido sigue causando poco efecto en los valores de rugosidad, pero se obtienen mejores valores cuando se hace en la dirección perpendicular.

En el caso de Rt medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 73,74%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.36.

Término	Coficiente
Constante	1,01988
C1	0,0289278
C2	-0,00018392
C3	-2,25440
C4	$-4,87967 * 10^{-5}$
C5	0,0418605
C6	0,00296975
C7	$-7,511 * 10^{-5}$

Tabla 5.36. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.59 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

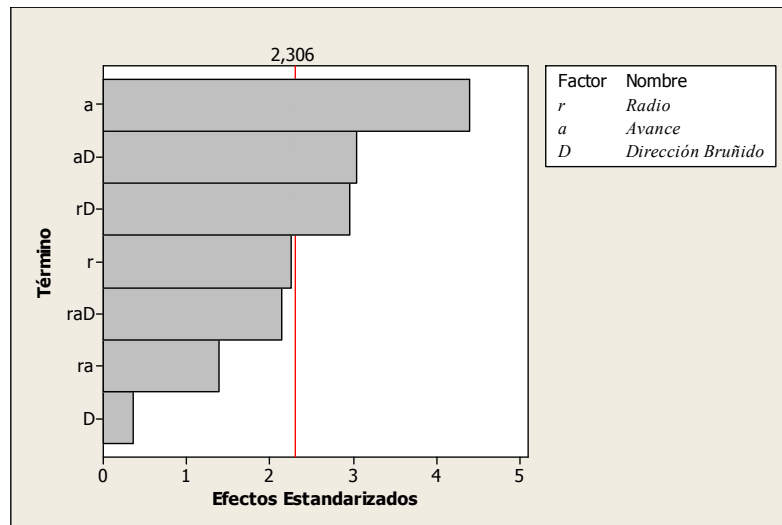


Figura 5.59. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Sobre R_t los parámetros significativos son: La velocidad de avance, la combinación de velocidad de avance + dirección del bruñido y la combinación radio de curvatura + dirección del bruñido.

En el gráfico de la figura 5.60 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_a resultantes.

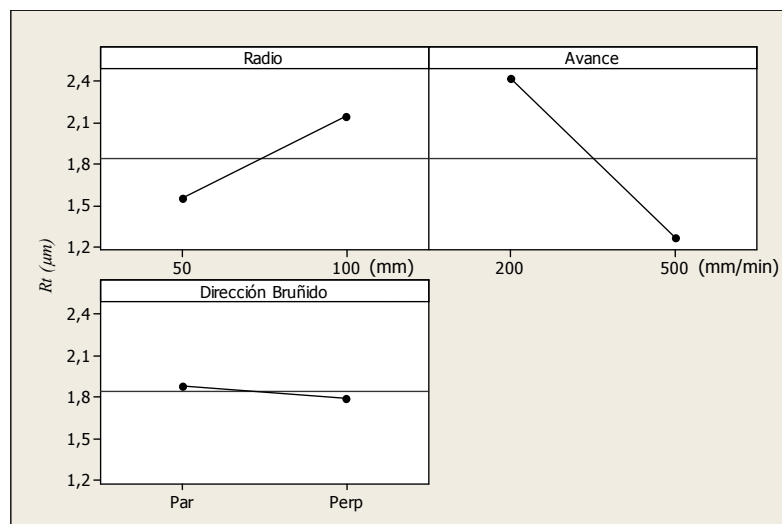


Figura 5.60. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias sin embargo, son similares a las que tienen los mismos parámetros para R_a en esta dirección.

5.5.2. Comentarios sobre los resultados del experimento

En una superficie convexa de radio entre los 50 y 100 mm fabricada de aluminio A92017 el proceso de bruñido también contribuye a mejorar la rugosidad superficial de las piezas ensayadas.

El radio de curvatura de la superficie es el parámetro que con más fuerza determina la rugosidad superficial que al final queda sobre esta. Sin embargo en el sentido perpendicular al avance del fresado previo, si se mide la rugosidad, la velocidad de avance de la herramienta es el parámetro más significativo. Esto quiere decir que la velocidad de avance no ha perdido protagonismo en las superficies planas, pero en las superficies curvas el radio de curvatura es sin duda quien manda sobre la calidad superficial. Hay que tener en cuenta que esto sucede para fuerzas de bruñido constantes, cosa que se ha asegurado que suceda durante todo momento en cada experimento. Si la fuerza no fuera constante los resultados seguramente fueran diferentes, como se ha podido demostrar en experimentos anteriores.

En el caso que se quiera bruñir una superficie de radio 100 mm es conveniente hacerlo perpendicular al fresado previo, es decir describiendo con la herramienta de bruñido líneas rectas y de esta manera el proceso ocurre como en una superficie plana. Así se puede conseguir disminuir el efecto negativo que ejerce sobre el proceso el hecho de realizarse en una superficie de radio grande.

En el gráfico de la figura 5.61 se puede encontrar el resumen de este experimento.

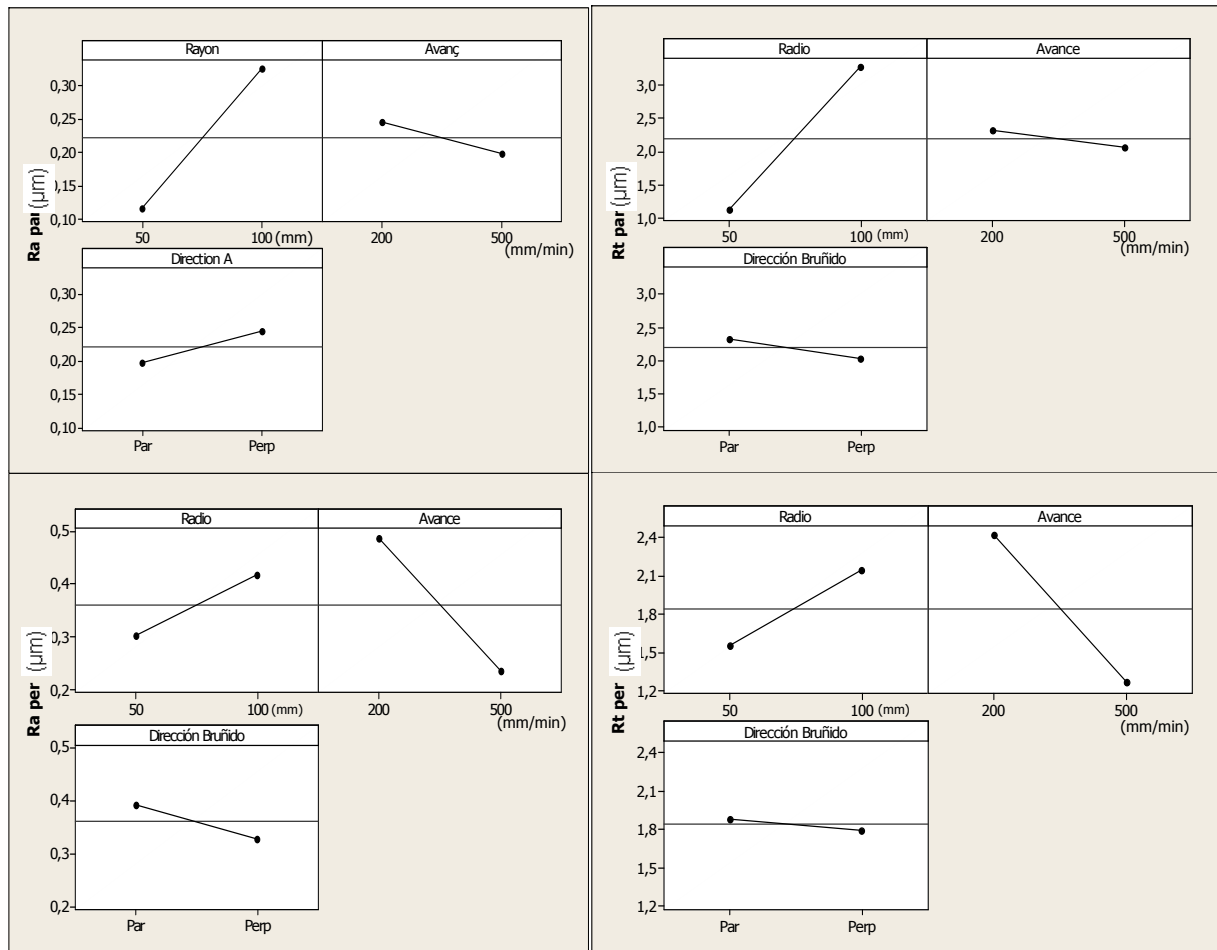


Figura 5.61. Gráfico resumen del quinto experimento

5.6. Sexto experimento. Estudio de las características del proceso de bruñido en piezas convexas de acero G10380

En condiciones similares al experimento anterior, se evalúa en este caso la rugosidad superficial resultante en una probeta convexa de acero G10380 (figura 5.62). El objetivo es establecer puntos en común y diferencias respecto a las probetas de aluminio A92017 del experimento anterior, para así demostrar que el proceso es conveniente independientemente del material de la pieza a elaborar.

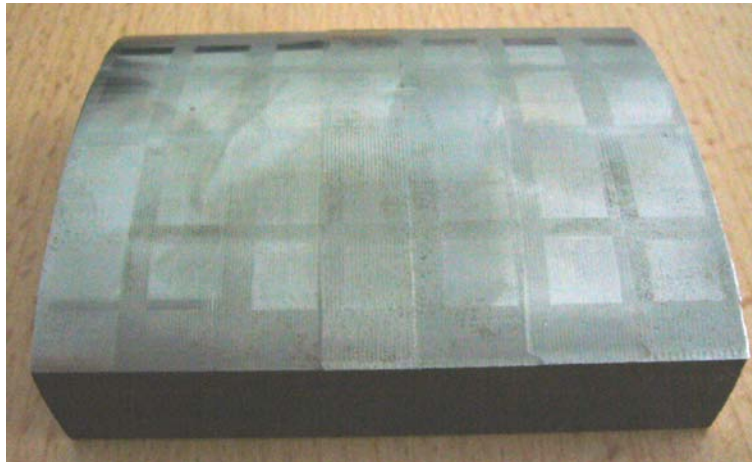


Figura 5.62. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir

Los valores que toman las variables, así como los resultados obtenidos, se pueden observar en la tabla 5.37.

No. Exp.	r (mm)	a (mm/min)	D	Ra par. (μm)	Rt par. (μm)	Ra per. (μm)	Rt per. (μm)
1	50	200	Par	0,1589	3,2426	0,5230	2,0223
2	100	200	Par	0,8213	6,3732	0,5319	2,2973
3	50	500	Par	0,2195	3,2720	0,7963	3,5370
4	100	500	Par	0,5536	5,3222	0,8184	3,5319
5	50	200	Per	0,1034	0,7153	0,8283	5,4373
6	100	200	Per	0,3355	2,1932	1,3076	7,0976
7	50	500	Per	0,1116	0,7104	0,4285	2,4230
8	100	500	Per	0,1803	1,4868	0,5155	2,1726
9	50	200	Par	0,1631	3,4265	0,6241	2,3306
10	100	200	Par	0,6161	4,5065	0,8296	3,3200
11	50	500	Par	0,3274	6,4135	0,5770	2,5576
12	100	500	Par	0,7527	5,2415	0,6645	2,8229
13	50	200	Per	0,0914	0,5542	0,5985	2,5478
14	100	200	Per	0,1620	1,1320	0,9259	5,1955
15	50	500	Per	0,0887	0,5610	0,4047	2,3786
16	100	500	Per	0,1883	1,1186	0,5030	2,6436
Fresado				0,7132	4,8651	1,6760	7,6036

Tabla 5.37. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados

5.6.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial

En la tabla de resultados (tabla 5.37), se puede observar como en los experimentos anteriores, que el valor de la rugosidad superficial media disminuye respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, en un 88 % en las medidas tomadas paralelas al avance

y en un 49 % en las tomadas perpendicularmente. Para R_t las disminuciones son de un 89 % y un 40 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente.

A continuación se muestran los resultados de las curvas de regresión del tipo de (4) para los indicadores de rugosidad evaluados: Ra par. y Rt par. y Ra per. y Rt per..

En el caso de Ra medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 87%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.38.

Término	Coefficiente
Constante	-0,345458
C1	0,00872517
C2	0,000600667
C3	0,244875
C4	$-8,17333 * 10^{-6}$
C5	-0,00480217
C6	$-3,675 * 10^{-4}$
C7	$3,69333 * 10^{-6}$

Tabla 5.38. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.63 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

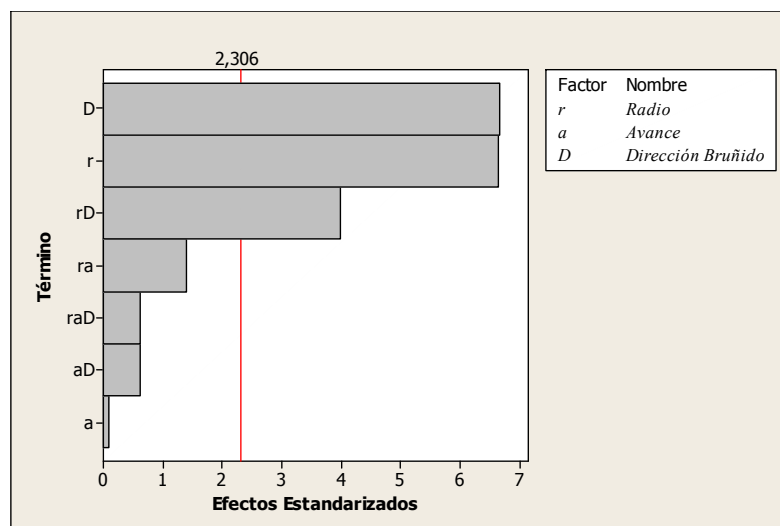


Figura 5.63. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para este material, la dirección en que se hace la operación de bruñido y el radio de curvatura son los parámetros significativos en los valores de Ra . También el efecto cruzado de ambos. La fuerza de

bruñido es un factor importante en este material y esta depende de la posición relativa entre la herramienta y la pieza, la cual está determinada por el radio de curvatura de la pieza y de la forma en que se realiza el proceso, lo cual está relacionado con la dirección del bruñido.

La velocidad de avance por su parte pierde el protagonismo al ser un material donde el fenómeno del endurecimiento por deformación casi no aparece.

Se eliminan los parámetros menos significativos y se pasa a hacer un segundo análisis para encontrar un modelo con un mejor ajuste. En el nuevo análisis y para un **R-Sq(adj) = 88,39%**, los coeficientes tomarán los valores de la tabla 5.39.

Término	Coeficiente
Constante	-0,135225
C1	0,0058645
C2	0
C3	0,11625
C4	0
C5	-0,0035095
C6	0
C7	0

Tabla 5.39. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.64 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

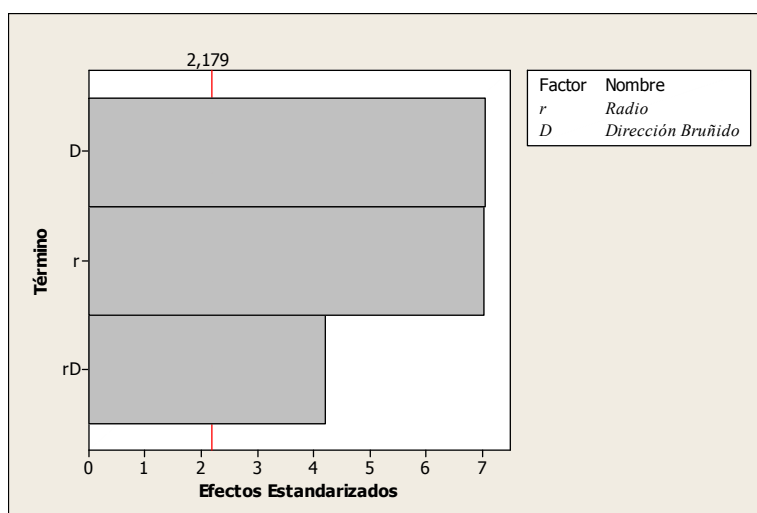


Figura 5.64. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.65 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro significativo sobre los valores de Ra resultantes.

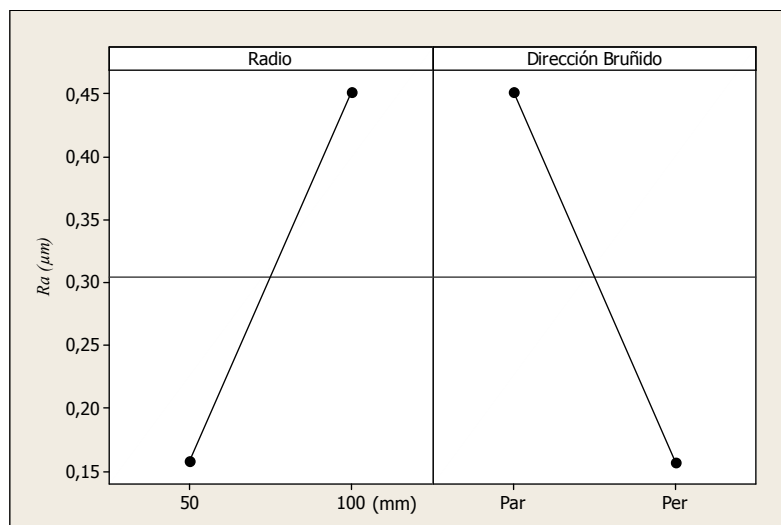


Figura 5.65. Efectos sobre R_a de las variables del proceso

Se puede observar claramente que los valores de R_a disminuyen cuando la dirección de bruñido es perpendicular al avance del fresado previo. Esto es totalmente lo contrario a lo que sucede en el Aluminio. Por otro lado se obtienen también buenos resultados de R_a en superficies de radio 50. Este comportamiento si que es bastante similar al que se observa para el aluminio A96351. La velocidad de avance no es nada representativa, como ya se había visto en el experimento con la probeta plana de este material.

En el caso de R_t medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 79,79%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.39.

Término	Coefficiente
Constante	-0,76066
C1	0,0448452
C2	0,00589367
C3	0,12636
C4	$-6,75683 \cdot 10^{-5}$
C5	-0,0194768
C6	-0,00468767
C7	$4,35117 \cdot 10^{-5}$

Tabla 5.40. Coeficientes de la curva de regresión para R_t par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.66 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

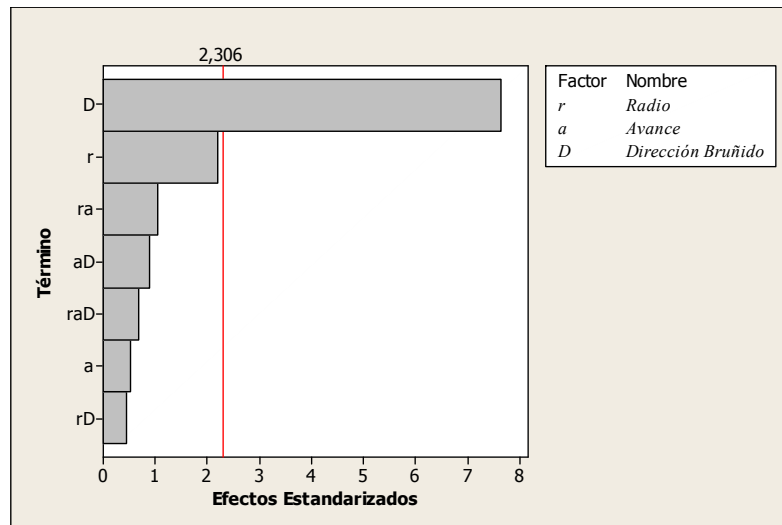


Figura 5.66. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para los valores de R_t la dirección del avance de la herramienta, es el parámetro más significativo, aunque el radio de curvatura tiene también cierta influencia. Estos resultados son similares a los obtenidos para R_a .

Se eliminan los parámetros menos significativos del modelo y se pasa a hacer un segundo análisis. En el nuevo análisis y para un $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 82,07\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.41.

Término	Coeficiente
Constante	1,30213
C1	0,0211962
C2	0
C3	-1,51433
C4	0
C5	-0,00424775
C6	0
C7	0

Tabla 5.41. Coeficientes de la curva de regresión para R_t par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.67 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

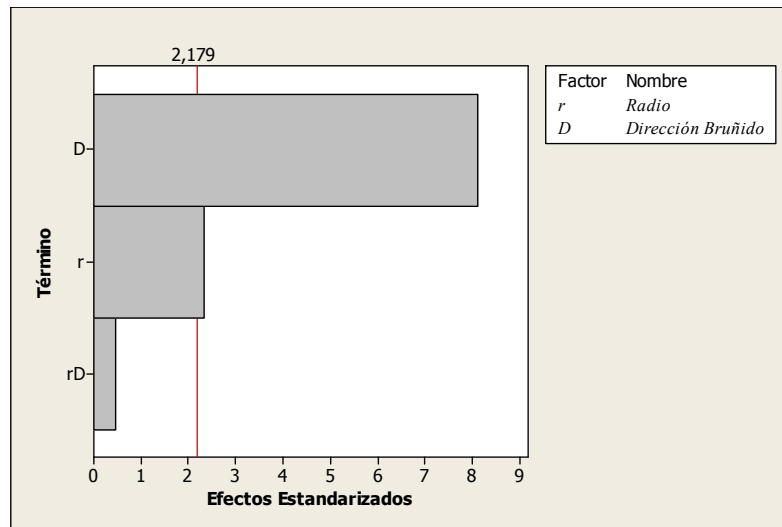


Figura 5.67. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.68 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro significativo sobre los valores de R_t resultantes.

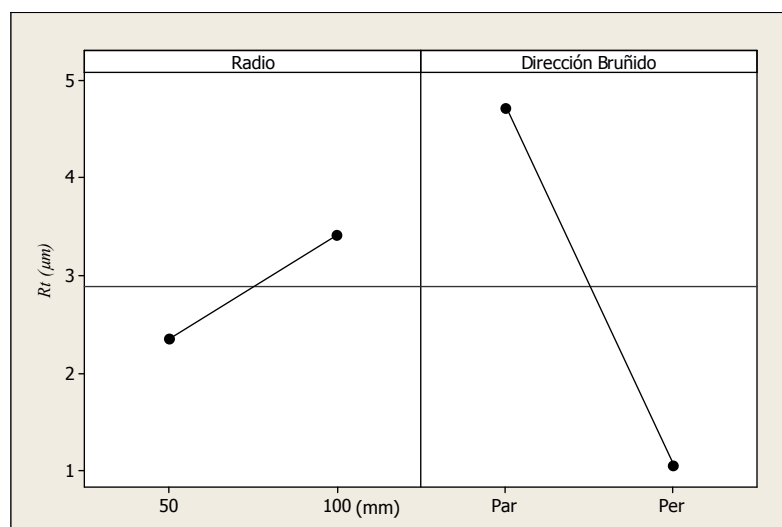


Figura 5.68. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias en este caso son similares a las que se han comentado anteriormente para R_a .

En el caso de R_a medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 56,44%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.42.

Término	Coficiente
Constante	0,3284
C1	0,00752617
C2	0,000299
C3	-0,027617
C4	$-1,21033 * 10^{-5}$
C5	0,0046835
C6	$-2,52667 * 10^{-4}$
C7	$-8,61 * 10^{-5}$

Tabla 5.42. Coeficientes de la curva de regresión para R_a per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.69 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

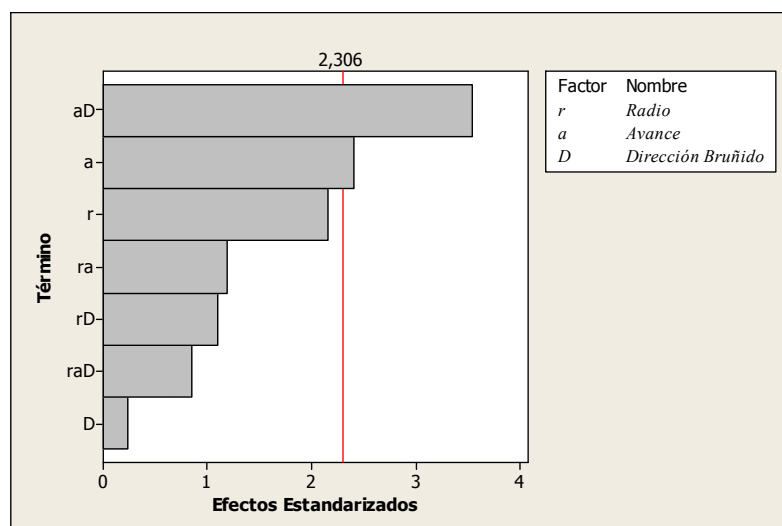


Figura 5.69. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para R_a medida en la dirección perpendicular al avance, la combinación de velocidad de avance + dirección del bruído y la velocidad de avance son los parámetros más significativos.

Nuevamente se eliminan los parámetros menos significativos del modelo y se pasa a hacer un segundo análisis. En el nuevo análisis y para un **R-Sq(adj) = 55,04%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.43.

Término	Coefficiente
Constante	0,646113
C1	0,00329
C2	-6,08750E-04
C3	0,323646
C4	0
C5	0
C6	-8,98417 * 10 ⁻⁴
C7	0

Tabla 5.43. Coeficientes de la curva de regresión para R_a per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.70 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

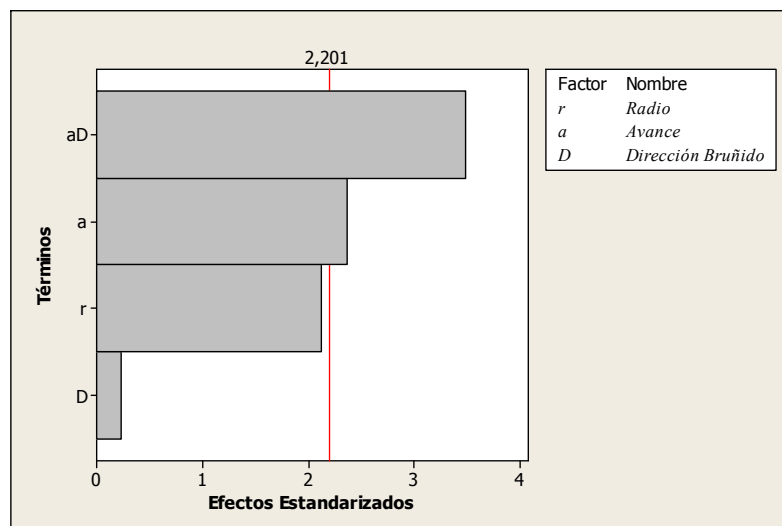


Figura 5.70. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.71 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_a resultantes.

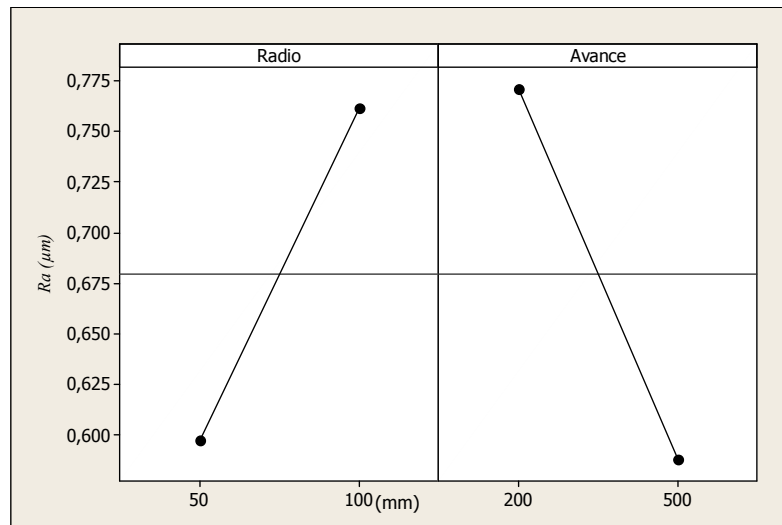


Figura 5.71. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

Se observa que los valores de Ra disminuyen en superficies de radio 50 y avances altos. Este comportamiento es bastante similar al que se observa para piezas convexas de aluminio A96351.

En el caso de Rt medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 55,15%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.44.

Término	Coeficiente
Constante	1,04877
C1	0,0455207
C2	0,00321317
C3	0,41982
C4	$-8,82933 * 10^{-5}$
C5	0,026182
C6	-0,00136333
C7	$-5,482 * 10^{-5}$

Tabla 5.44. Coeficientes de la curva de regresión para Rt per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.72 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

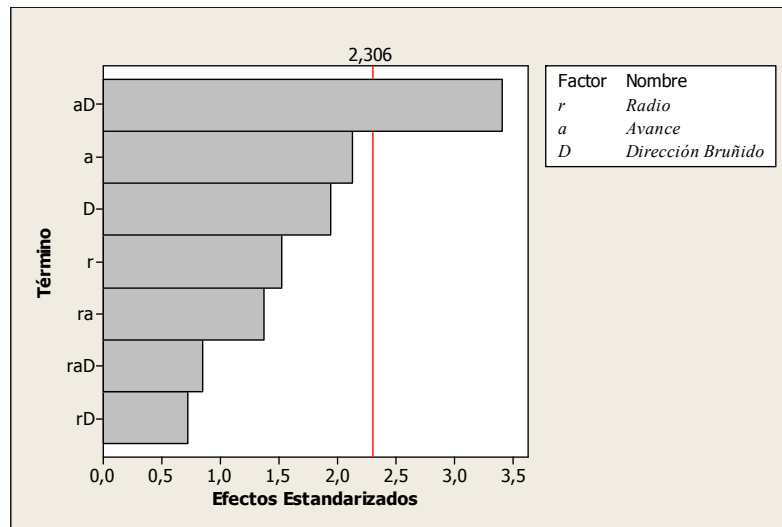


Figura 5.72. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La influencia de los parámetros sobre R_t es similar a la que ejercen sobre R_a medidos en esta dirección (perpendicular al avance de la herramienta de fresado), pero la velocidad de avance pierde importancia.

Siguiendo el mismo procedimiento, se eliminan los parámetros menos significativos del modelo y se pasa a hacer un segundo análisis. En el nuevo análisis y para un $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 54,5\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.45.

Término	Coeficiente
Constante	3,36647
C1	0,0146180
C2	-0,00340883
C3	2,38347
C4	0
C5	0
C6	-0,00547483
C7	0

Tabla 5.45. Coeficientes de la curva de regresión para R_t per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.73 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

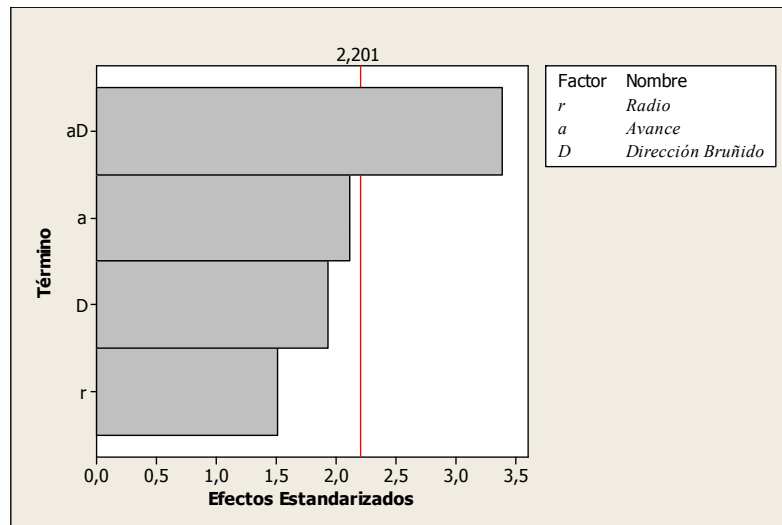


Figura 5.73. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.74 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_t resultantes.

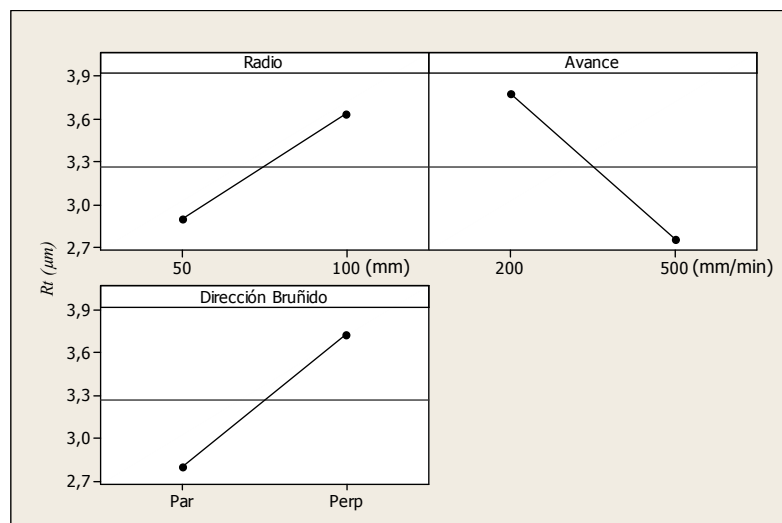


Figura 5.74. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias también son similares a las que tienen los mismos parámetros para R_a , solo que la dirección del bruñido provoca cambios más significativos.

5.6.2. Comentarios sobre los resultados del experimento

En una superficie convexa de radio entre los 50 y 100 mm, fabricada de acero G10380, el proceso de bruñido también contribuye a mejorar la rugosidad superficial de las piezas ensayadas.

La dirección del bruñido es el parámetro más significativo en el caso de este material. A diferencia del Aluminio, la velocidad de avance no es significativa en el sentido paralelo al avance del fresado previo, aunque sí que afecta los valores medidos paralelos a éste.

Se siguen obteniendo los mejores valores de rugosidad en la superficie de menor radio y para mayores velocidades de avance. En el caso de la dirección del bruñido, los valores medidos en el sentido paralelo al avance del fresado son más pequeños para el bruñido perpendicular y en el sentido perpendicular al fresado, los valores menores de rugosidad se obtienen con el bruñido realizado paralelo al avance del fresado.

En el gráfico resumen de la figura 5.75, se pueden ver reflejados los comentarios anteriores.

Para comprobar que el proceso de bruñido con bola es conveniente para mejorar el acabado de superficies complejas, se pasará a estudiar sus resultados en dos probetas con superficies cóncavas fabricadas de los mismos materiales de las probetas del quinto y sexto experimento.

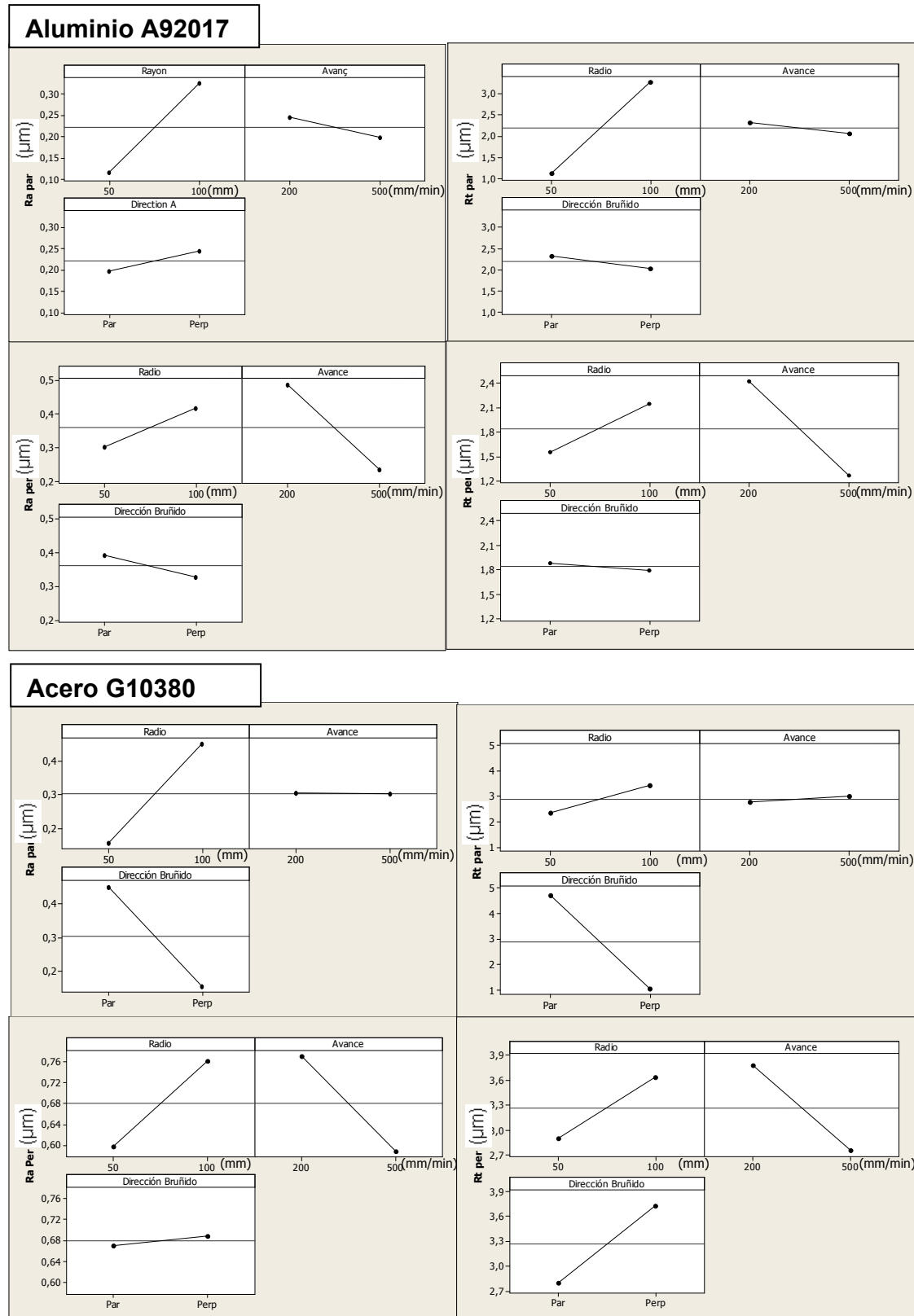


Figura 5.75. Gráfico resumen de los experimentos 5 y 6.

5.7. Séptimo experimento. Estudio de las características del proceso de bruñido en piezas cóncavas de Aluminio A92017

Tras evaluar las características del proceso de bruñido con bola en piezas convexas, se ha realizado un experimento donde se utilizan probetas con una superficie cóncava fabricadas de aluminio A92017 (figura 5.76). Esta superficie cóncava al igual que la convexa del quinto experimento, está compuesta de tres zonas en las que hay tres curvas de radio 50, 100 y 50 mm respectivamente. Estas curvas han sido logradas utilizando fresas esféricas de diferentes diámetros, pero como requisito de partida de cada operación de fresado se ha tomado la altura de cresta resultante constante.

Encima de cada zona fresada entonces se realiza la operación de bruñido. Esta operación se hace a cada vez con tres velocidades de avance diferentes. Es decir en cada zona bruñida se pueden encontrar tres sub-zonas donde la diferencia entre ellas está en los valores de velocidades de avance utilizados.

De esta manera los parámetros o variables del sistema a evaluar en este caso son: el radio de curvatura de la superficie a bruñir, la velocidad de avance de la herramienta de bruñir y la estrategia de mecanizado utilizada que se concreta en cambiar la dirección con la que se hace el bruñido. Esta última se realiza paralela a la dirección del avance del fresado o perpendicular a éste.

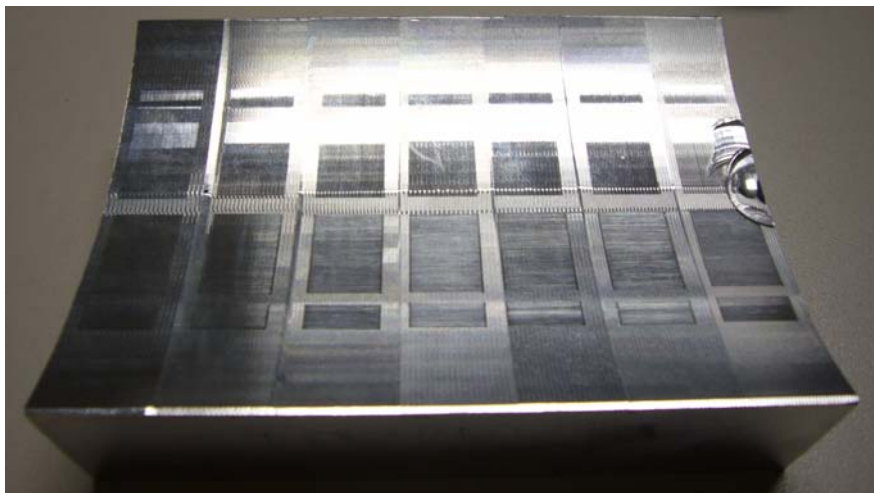


Figura 5.76. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir

Estos parámetros a evaluar dan como resultado un diseño experimental 2^3 , es decir 8 combinaciones, con dos iteraciones, lo cual hace un total de 16 experimentos diferentes. Los valores que toman estas variables, así como los resultados obtenidos, se pueden observar en la tabla 5.46.

No. Exp.	r (mm)	a (mm/min)	D	Ra par. (μ m)	Rt par. (μ m)	Ra per. (μ m)	Rt per. (μ m)
1	50	200	Par	0,1506	1,0582	0,1827	1,0502
2	100	200	Par	0,0964	1,2843	0,1483	0,7812
3	50	500	Par	0,1243	0,6205	0,1570	0,9910
4	100	500	Par	0,0847	0,8121	0,2090	1,1357
5	50	200	Per	0,2217	1,4248	0,1326	1,4239
6	100	200	Per	0,2179	1,3444	0,0594	0,8050
7	50	500	Per	0,1918	1,2466	0,0431	0,3916
8	100	500	Per	0,1307	1,2764	0,0527	0,9787
9	50	200	Par	0,1731	1,5564	0,1290	1,0432
10	100	200	Par	0,0906	0,9665	0,1327	0,9322
11	50	500	Par	0,1151	0,5554	0,1300	1,0337
12	100	500	Par	0,0953	0,8047	0,1554	1,1627
13	50	200	Per	0,2564	1,6647	0,1540	0,8191
14	100	200	Per	0,1743	1,3073	0,0658	0,5035
15	50	500	Per	0,1306	0,8300	0,0744	0,4634
16	100	500	Per	0,1566	1,2015	0,0503	0,9324
Fresado				0,2557	1,8200	0,8215	3,6271

Tabla 5.46. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados

5.7.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial

En la tabla de resultados (tabla 5.46), se puede observar como en los experimentos anteriores, que el valor de la rugosidad superficial media disminuye respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, en un 77 % en las medidas tomadas paralelas al avance y en un 74 % en las tomadas perpendicularmente. Para Rt las disminuciones son de un 76 % y un 60 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares al avance respectivamente.

Se han medido los mismos indicadores de rugosidad superficial: Ra y Rt . Y ambos en la dirección del avance de la herramienta (Ra par. y Rt par.) y en la dirección perpendicular a éste (Ra per. y Rt per.). Se obtendrán 4 curvas de regresión como (4), correspondientes cada una de ellas a cada valor medido.

En el caso de Ra medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 80,77%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.47.

Término	Coefficiente
Constante	0,31745
C1	-0,00154
C2	$-3,0675 * 10^{-4}$
C3	0,0333833
C4	$2,135 * 10^{-6}$
C5	0,000342333
C6	$-3,74167 * 10^{-5}$
C7	$-4,41667 * 10^{-7}$

Tabla 5.47. Coeficientes de la curva de regresión para R_a par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.77 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

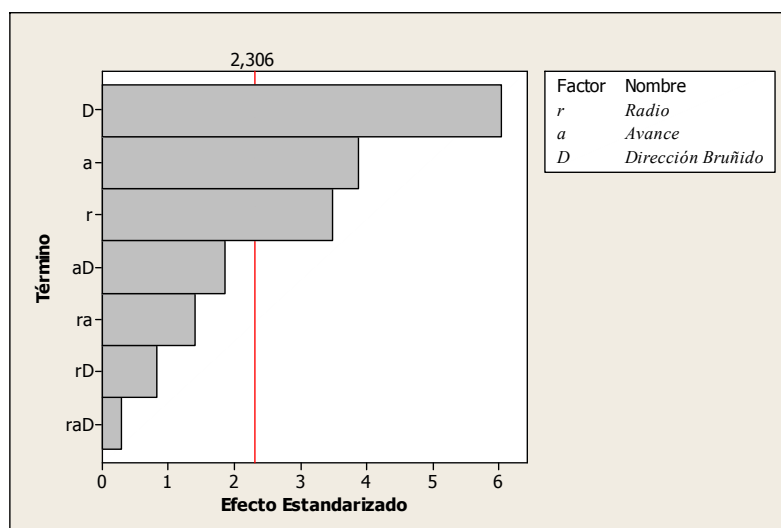


Figura 5.77. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La dirección del bruñido, la velocidad de avance y el radio de curvatura, son los parámetros significativos sobre R_a en este experimento. Para este material ya se ha observado en los experimentos previos que los tres parámetros ejercían influencia sobre los resultados. La dirección de bruñido es el parámetro con la mayor importancia relativa, producto de que según se haga el bruñido, este ocurre en una superficie plana o en una superficie curva, lo cual varía bastante la fuerza que se aplica en el proceso. El radio de curvatura es significativo porque, como se había explicado anteriormente, la componente de fuerzas que actúa en el proceso a lo largo de una superficie curva, varía su valor. Este material tiene un coeficiente bajo de auto-endurecimiento, con lo cual la velocidad de avance también define mucho los resultados del proceso.

Tal como se ha hecho en los experimentos anteriores, se eliminan los parámetros menos significativos del modelo y se pasa a hacer un segundo análisis. En el nuevo análisis y para un **R-Sq(adj) = 77,21%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.48.

Término	Coeficiente
Constante	0,261406
C1	$-7,9275 \cdot 10^{-4}$
C2	$-1,46625 \cdot 10^{-4}$
C3	0,0343688
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 5.48. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.78 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

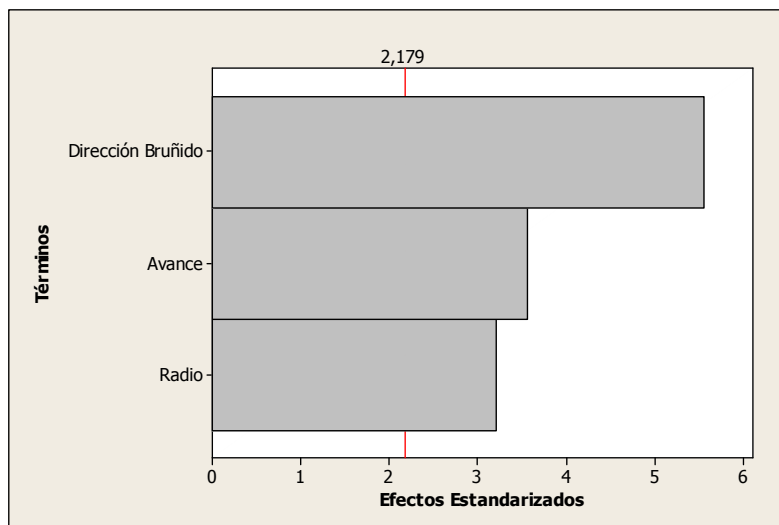


Figura 5.78. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.79 se puede observar la influencia de la variación de todos los parámetros sobre los valores de Ra resultantes.

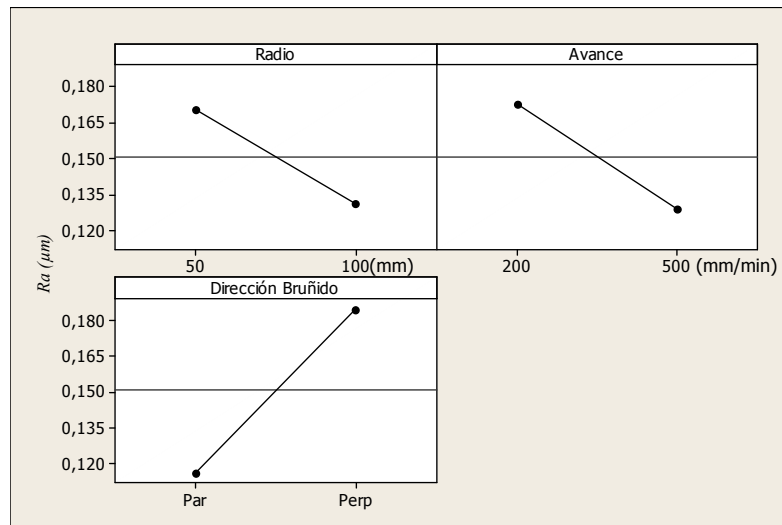


Figura 5.79. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

Cuando aumenta el radio de curvatura de la superficie, aumenta Ra , es decir se pueden lograr mejores valores de Ra en superficies curvas de radio más pequeños. También son pequeños los valores de Ra par. a velocidades de avance mayores y cuando el bruñido se realiza paralelo al fresado.

En el caso de Rt medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un **R-Sq(adj) = 65,63%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.49.

Término	Coefficiente
Constante	2,30899
C1	-0,00948733
C2	-0,00341283
C3	0,071992
C4	$2,73967 \cdot 10^{-5}$
C5	-0,00048467
C6	0,00032617
C7	$5,73333 \cdot 10^{-7}$

Tabla 5.49. Coeficientes de la curva de regresión para Rt par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.80 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

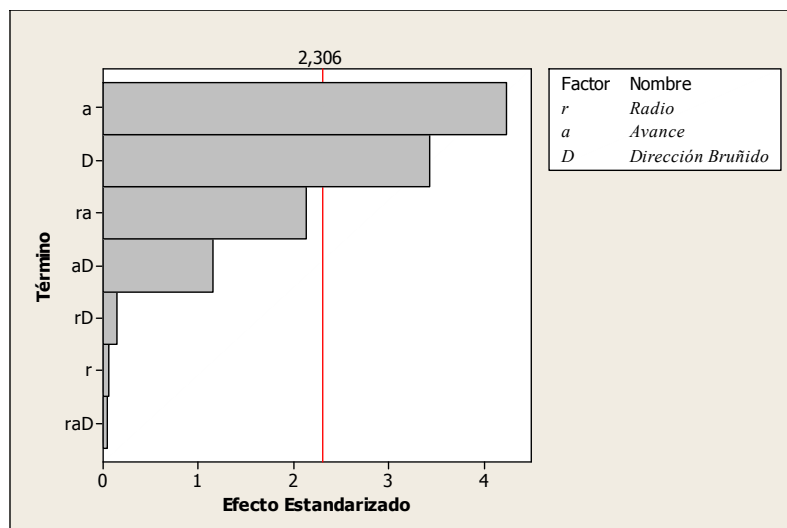


Figura 5.80. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para el caso de R_t , pierde protagonismo el radio de curvatura y lo ganan la velocidad de avance y la dirección en la que se realiza el bruñido.

Se eliminan los parámetros menos significativos del modelo y se pasa a obtener un segundo modelo con mejor ajuste. En el nuevo análisis y para un **R-Sq(adj) = 63,93%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.50.

Término	Coeficiente
Constante	1,59744
C1	0
C2	-0,00135808
C3	0,035642
C4	0
C5	0
C6	0,000369167
C7	0

Tabla 5.50. Coeficientes de la curva de regresión para R_a par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.81 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

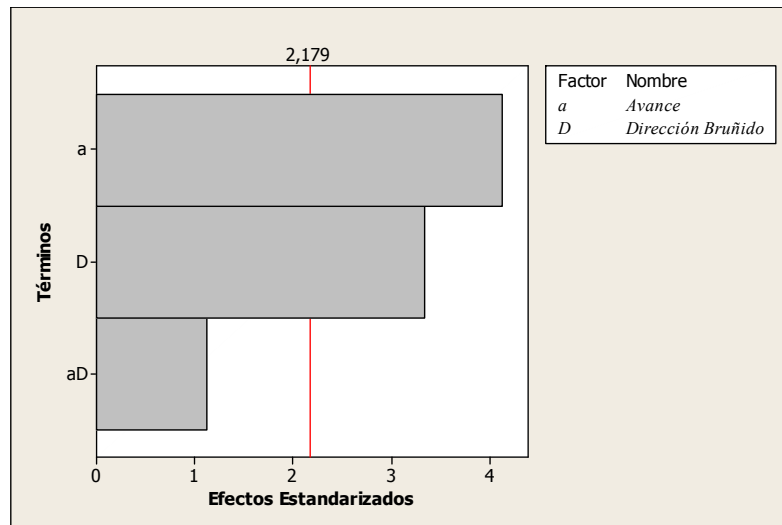


Figura 5.81. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.82 se puede observar la influencia de la variación de las velocidades de avance y de la dirección en que se realiza el bruñido sobre los valores de R_t resultantes.

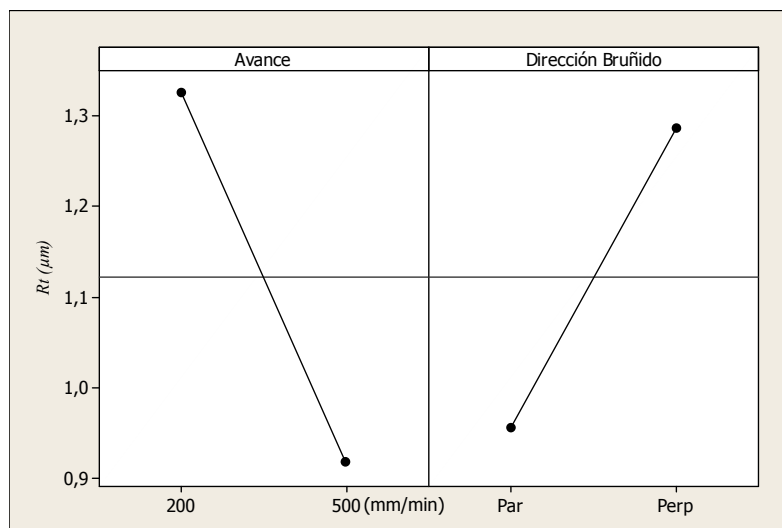


Figura 5.82. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias en este caso son bastante similares a las que se observan para R_a , excepto por la pérdida de protagonismo del radio de curvatura de la superficie.

En el caso de R_a medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un $R-Sq(adj) = 81,13\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.51.

Término	Coeficiente
Constante	0,2724
C1	-0,0018105
C2	$-3,74 * 10^{-4}$
C3	0,0569333
C4	$4,25 * 10^{-6}$
C5	$-7,82833 * 10^{-4}$
C6	$-1,52667 * 10^{-4}$
C7	$6,46667 * 10^{-7}$

Tabla 5.51. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.83 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

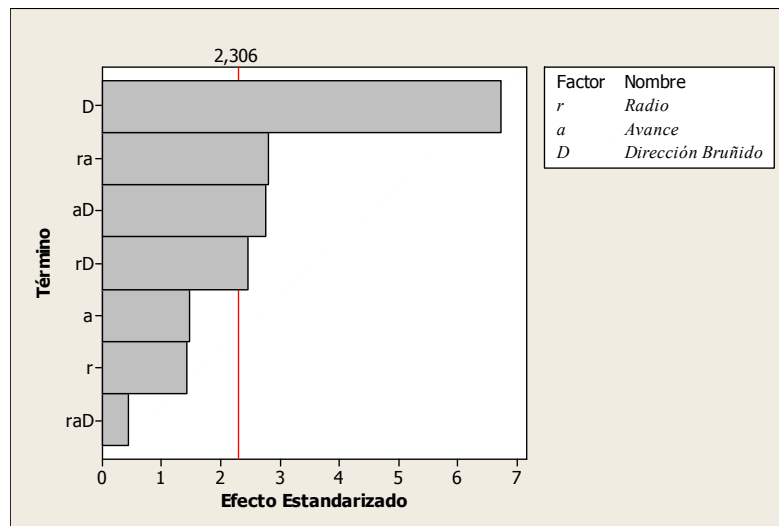


Figura 5.83. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La dirección del bruído es el parámetro más significativo para los valores de Ra medidos en la dirección perpendicular al avance del fresado.

Se dejan solamente los parámetros significativos del modelo y se pasa a hacer un segundo análisis. En el nuevo análisis y para un **R-Sq(adj) = 82,84%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.52.

Término	Coefficiente
Constante	0,2724
C1	-0,0018105
C2	-3,74 *10 ⁻⁴
C3	0,0399583
C4	4,25 *10 ⁻⁶
C5	-5,565 *10 ⁻⁴
C6	-1,04167 *10 ⁻⁴
C7	0

Tabla 5.52. Coeficientes de la curva de regresión para R_a par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.84 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

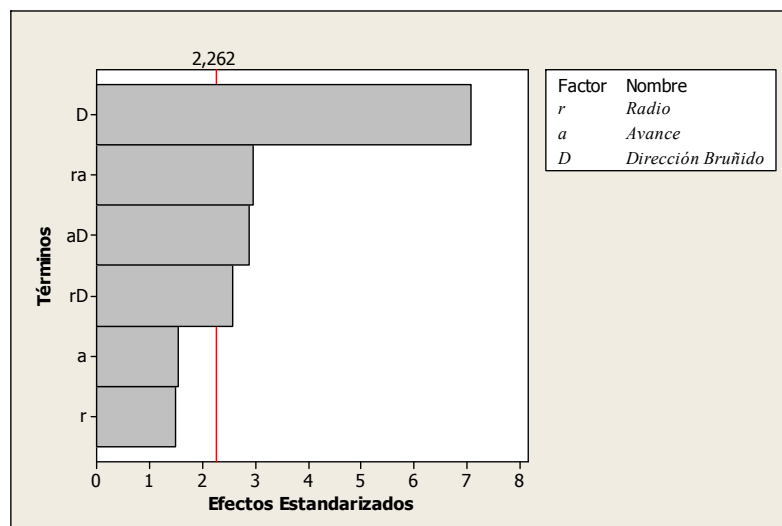


Figura 5.84. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.85 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_a resultantes.

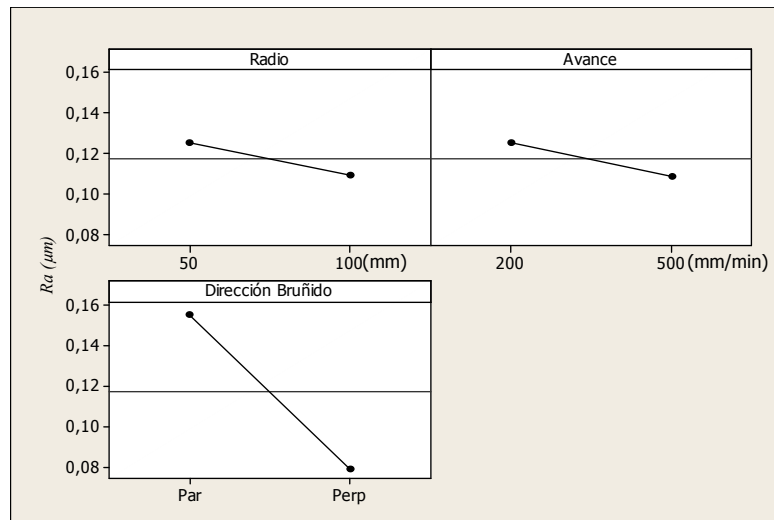


Figura 5.85. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

Aquí se puede notar un cambio en cuanto a la influencia de la dirección del bruñido. Ra toma valores más pequeños cuando el bruñido se realiza perpendicular a la dirección del avance del fresado, en la superficie de diámetro 100 mm y para avances de 500 mm/min.

En el caso de R_t medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 58,76\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.53.

Término	Coefficiente
Constante	2,09622
C1	-0,0153868
C2	-0,0034175
C3	0,618725
C4	$4,40717 * 10^{-5}$
C5	-0,00722883
C6	-0,0022135
C7	$2,22817 * 10^{-5}$

Tabla 5.53. Coeficientes de la curva de regresión para R_t per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.86 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

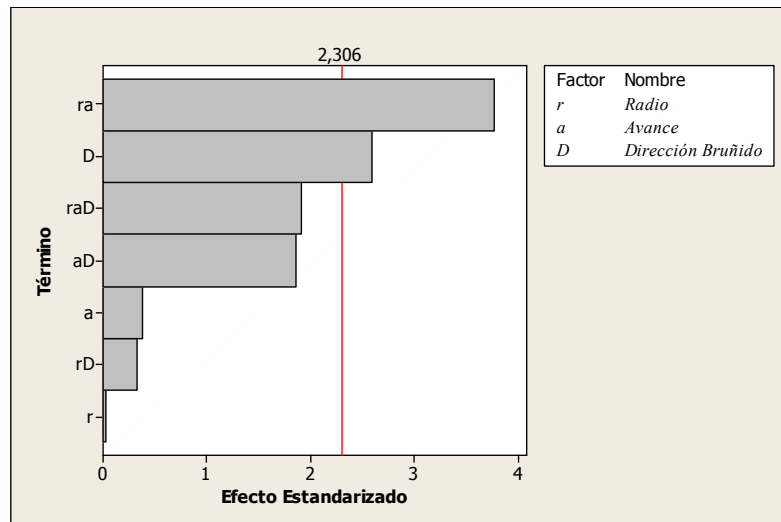


Figura 5.86. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Sobre R_t los parámetros significativos son: la combinación del radio de curvatura + la velocidad de avance y la dirección del bruñido.

En el gráfico de la figura 5.87 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_a resultantes.

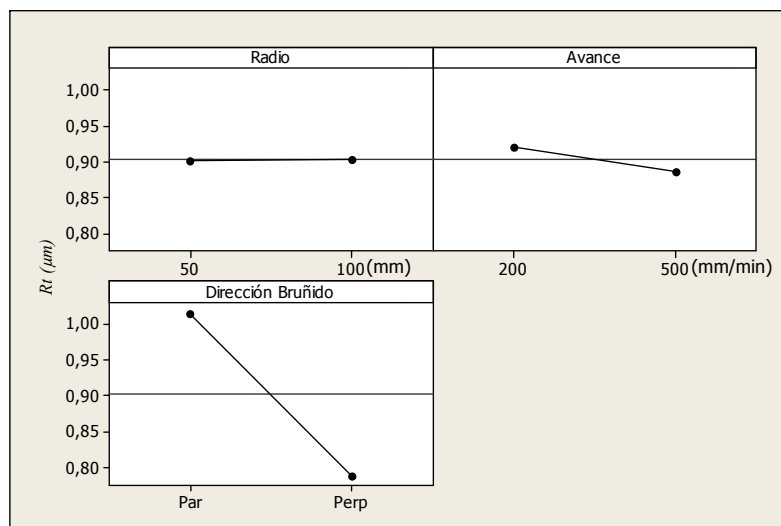


Figura 5.87. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias sin embargo, son similares a las que tienen los mismos parámetros para R_a en esta dirección.

5.7.2. Comentarios sobre los resultados del experimento

En una superficie cóncava de radio entre los 50 y 100 mm fabricada de aluminio A92017 el proceso de bruñido también contribuye a mejorar la rugosidad superficial de las piezas ensayadas.

La dirección en que se ha realizado el proceso de bruñido es el parámetro que de manera general afecta más a los resultados de los indicadores de la rugosidad superficial en este experimento. También el radio de curvatura ejerce influencia sobre estos indicadores, obteniéndose en este caso mejores resultados de rugosidad para radios de 100 mm. Esto es contrario a lo que sucedía anteriormente en el caso de las probetas convexas (figura 5.88), donde los mejores resultados de rugosidad se obtenían para radio 50 mm.

La velocidad de avance por su parte también tiene cierto protagonismo en este material, lo cual ha sucedido también anteriormente en los experimentos realizados con otras probetas de este mismo material, aunque el protagonismo no es tan alto como en los casos en que el material era aluminio A96351.

En la figura 5.88, se grafican los comentarios anteriores sobre las diferencias entre los resultados obtenidos entre este experimento y el experimento donde se ensayaron probetas del mismo aluminio (A92017) pero con una superficie convexa.

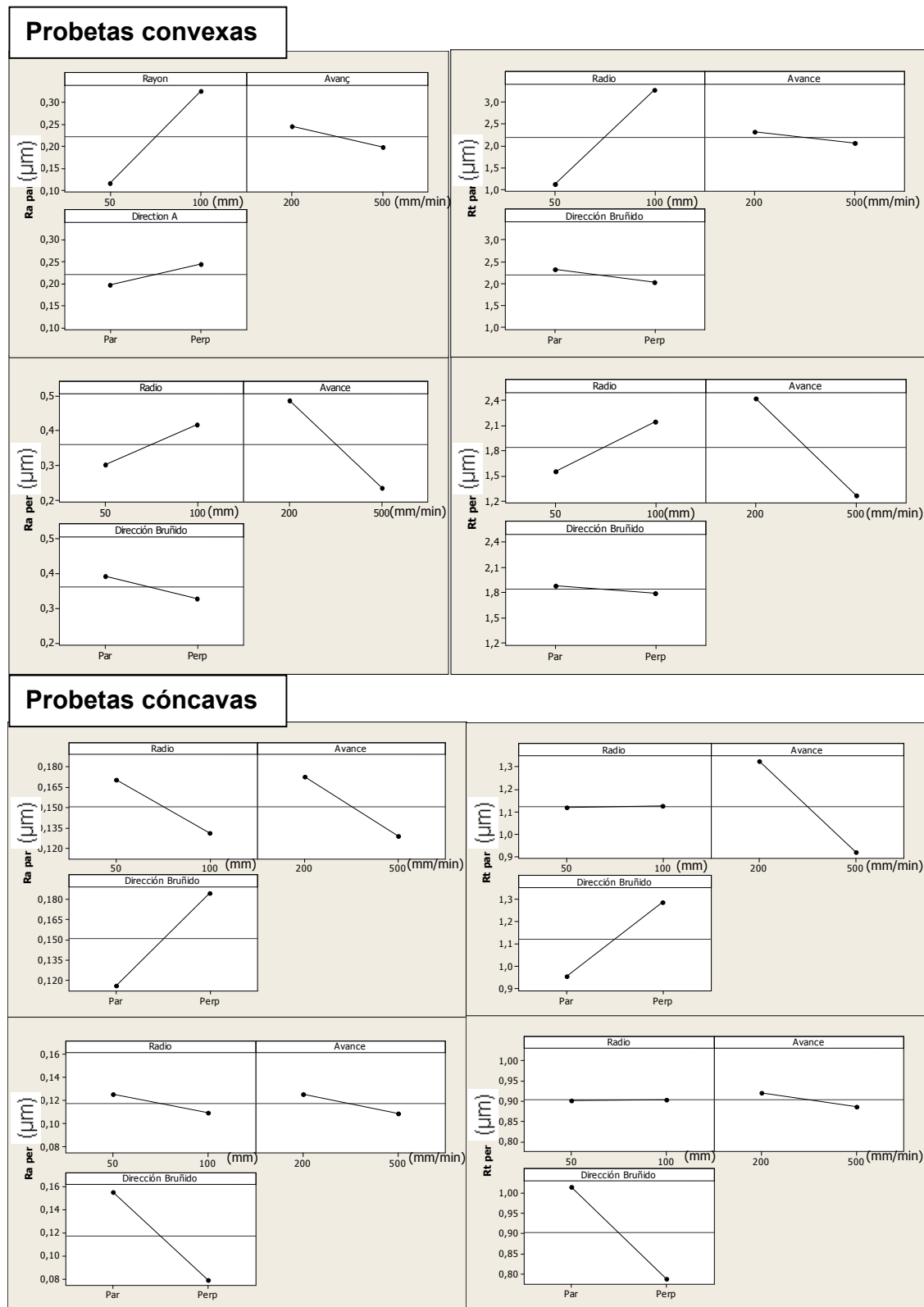


Figura 5.88. Gráfico comparativo entre los resultados de rugosidad para probetas convexas y cóncavas de Aluminio A92017

Se pasará a realizar, por último, un experimento similar al anterior pero utilizando para ello probetas fabricadas en acero G10380.

5.8. Octavo experimento. Estudio de las características del proceso de bruñido en piezas cóncavas de Acero G10380

En condiciones similares al experimento anterior, se evalúa en este caso la rugosidad superficial resultante en una probeta cóncava de acero G10380 (figura 5.89). El objetivo es establecer puntos en común y diferencias respecto a las probetas de aluminio A92017 del experimento anterior, así como con las probetas convexas del mismo material del experimento número seis.



Figura 5.89. Probeta utilizada para los ensayos de rugosidad superficial después de bruñir

Los valores que toman las variables, así como los resultados obtenidos, se pueden observar en la tabla 5.54.

No. Exp.	r (mm)	a (mm/min)	D	Ra par. (μm)	Rt par. (μm)	Ra per. (μm)	Rt per. (μm)
1	50	200	Par	0,1388	1,0509	0,3179	1,4426
2	100	200	Par	0,0979	1,0745	0,1530	0,9431
3	50	500	Par	0,0548	0,3958	0,3552	1,5525
4	100	500	Par	0,0851	0,7004	0,1680	1,0024
5	50	200	Per	0,0855	1,0533	0,3253	2,5111
6	100	200	Per	0,1856	1,7346	0,2663	2,1591
7	50	500	Per	0,0509	0,4388	0,2317	1,9140
8	100	500	Per	0,1327	1,0554	0,2370	2,2532
9	50	200	Par	0,1375	1,0382	0,2996	1,4572
10	100	200	Par	0,1063	1,0487	0,1695	0,6175
11	50	500	Par	0,0669	0,3769	0,3674	1,2996
12	100	500	Par	0,0869	0,9649	0,1504	0,9272
13	50	200	Per	0,0912	1,1307	0,3412	2,8130
14	100	200	Per	0,1504	1,6431	0,2853	2,0080
15	50	500	Per	0,0595	0,4623	0,2389	1,8170
16	100	500	Per	0,3451	1,7514	0,3223	2,5052
Fresado				0,4281	3,0103	0,9316	4,5837

Tabla 5.54. Resultado de las mediciones de rugosidad en los experimentos realizados

5.8.1. Análisis de los resultados de las mediciones de rugosidad superficial

En la tabla de resultados (tabla 5.54), se puede observar como en los experimentos anteriores, que el valor de la rugosidad superficial media disminuye respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, en un 90 % en las medidas tomadas paralelas al avance y en un 89 % en las tomadas perpendicularmente. Para Rt las disminuciones son de un 86 % para las medidas tomadas paralelas y perpendiculares.

A continuación se muestran los resultados de las curvas de regresión del tipo de (4) para los indicadores de rugosidad evaluados: Ra par. y Rt par. y Ra per. y Rt per..

En el caso de Ra medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un $R-Sq(adj) = 43,24\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.55.

Término	Coefficiente
Constante	0,18335
C1	-0,00066567
C2	$-4,595 * 10^{-4}$
C3	-0,083183
C4	$5,50833 * 10^{-6}$
C5	0,00087133
C6	0,000002167
C7	$1,42833 * 10^{-6}$

Tabla 5.55. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.90 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

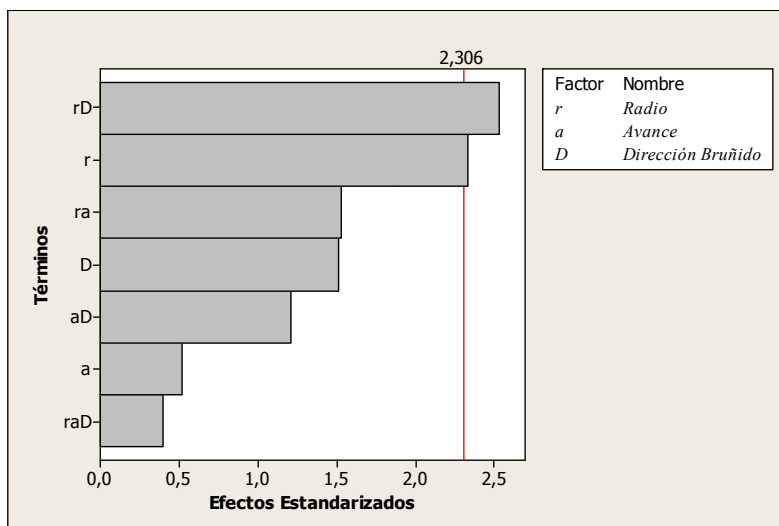


Figura 5.90. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En este caso, el radio de curvatura es el parámetro más significativo, conjuntamente con la combinación entre este y la dirección en que se hace la operación de bruñido. Para este experimento el **R-Sq(adj)** tiene un valor bajo. Como era de esperar la velocidad de avance no ejerce ninguna influencia sobre los resultados.

Se eliminan los parámetros menos significativos del modelo y se pasa a hacer un segundo análisis. En el nuevo análisis y para un **R-Sq(adj) = 42,13%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.56.

Término	Coeficiente
Constante	0,022525
C1	0,00126225
C2	0
C3	-0,082425
C4	0
C5	0,00137125
C6	0
C7	0

Tabla 5.56. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.91 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

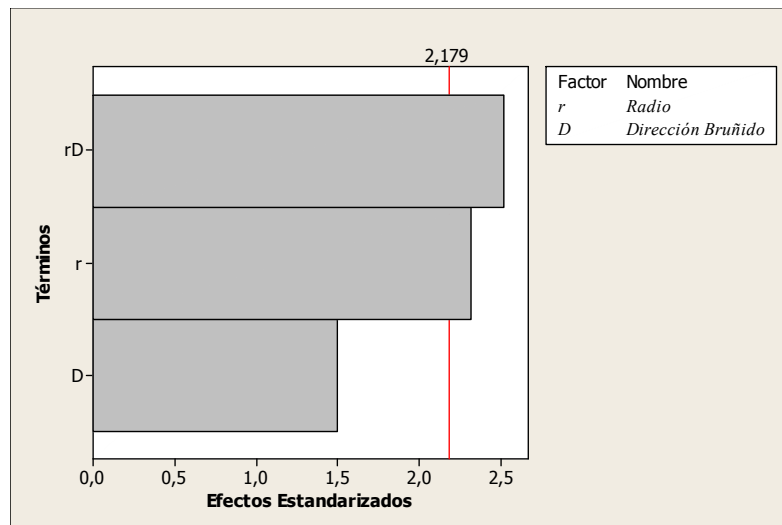


Figura 5.91. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.92 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro significativo sobre los valores de Ra resultantes.

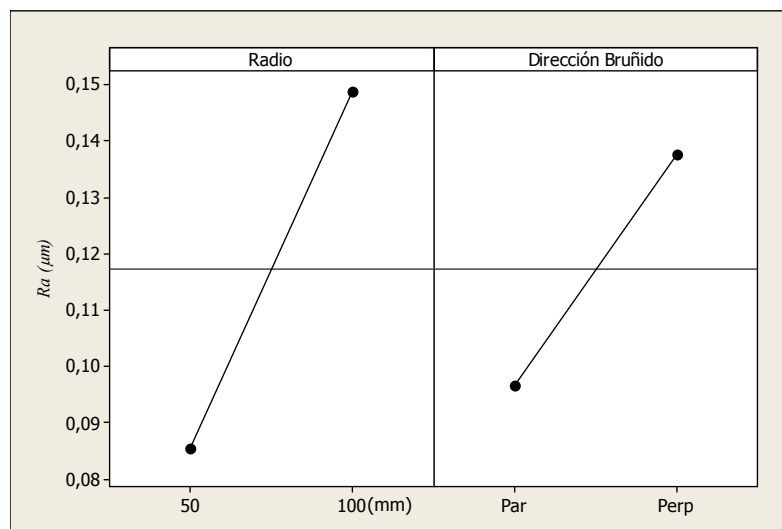


Figura 5.92. Efectos sobre Ra de las variables del proceso

Se puede observar claramente que los valores de Ra disminuyen cuando la dirección de bruñido es paralela al avance del fresado previo. Por otro lado se obtienen también buenos resultados de Ra en superficies de radio 50. Este comportamiento si que es bastante similar al que se observa para el aluminio A96351.

En el caso de R_t medida en el sentido paralelo al avance de la fresa y para un $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 82,18\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.57.

Término	Coeficiente
Constante	1,45629
C1	0,000904
C2	-0,00347483
C3	-0,296175
C4	$2,6175 * 10^{-5}$
C5	0,00628633
C6	0,00015
C7	$-2,44167 * 10^{-6}$

Tabla 5.57. Coeficientes de la curva de regresión para R_t par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.93 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

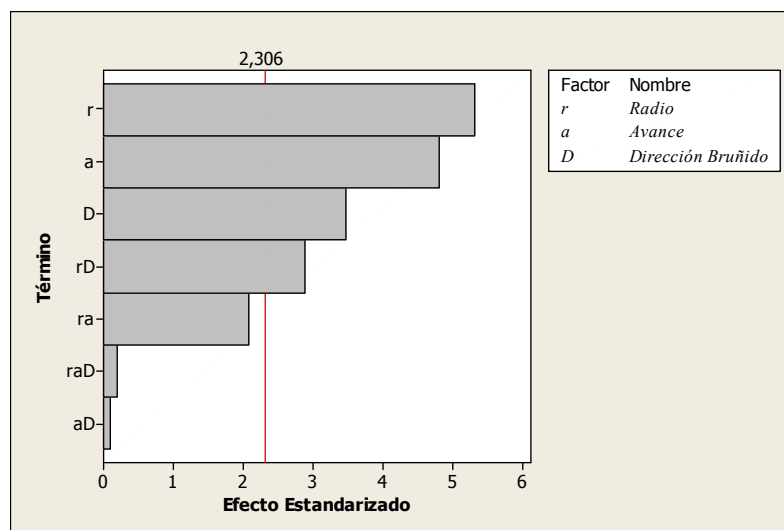


Figura 5.93. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para los valores de R_t , el radio de curvatura es el parámetro más significativo, aunque en este caso la velocidad de avance y la dirección en la que se hace el bruñido también ejercen influencia.

Se eliminan los parámetros menos significativos del modelo y se pasa a hacer un segundo modelo. En el nuevo análisis y para un $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 79,95\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.68.

Término	Coefficiente
Constante	0,769198
C1	0,0100652
C2	-0,00151171
C3	-0,243675
C4	0
C5	0,00543175
C6	0
C7	0

Tabla 5.58. Coeficientes de la curva de regresión para R_t par.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.94 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

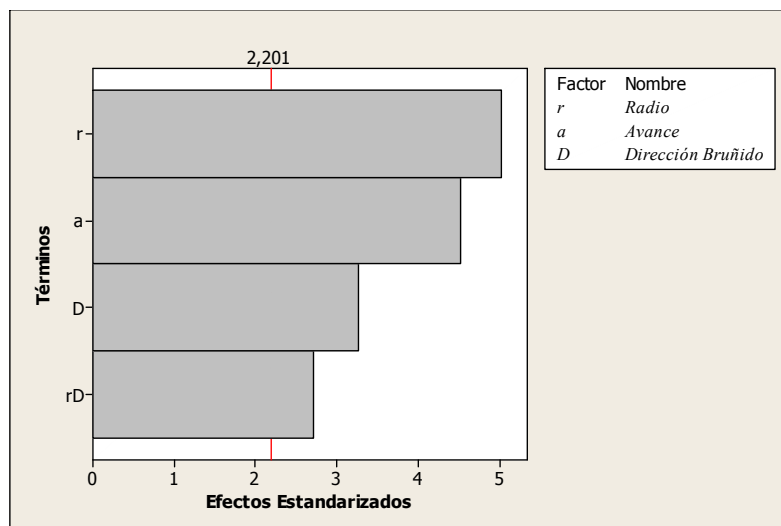


Figura 5.94. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.95 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro significativo sobre los valores de R_t resultantes.

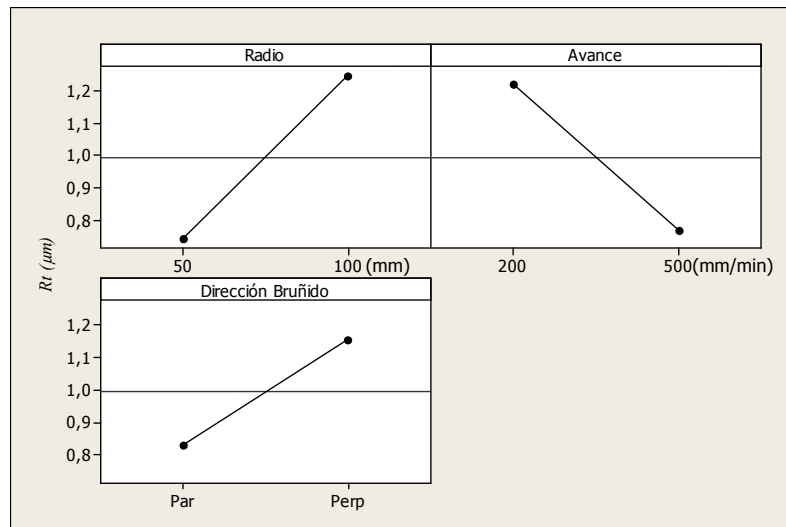


Figura 5.95. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias en este caso son similares a las que se han comentado anteriormente para R_a .

En el caso de R_a medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 89,77\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.59.

Término	Coefficiente
Constante	0,454342
C1	-0,00236417
C2	$-1,54333 \cdot 10^{-4}$
C3	0,069525
C4	$1,57333 \cdot 10^{-6}$
C5	$-1,42167 \cdot 10^{-4}$
C6	$-5,115 \cdot 10^{-4}$
C7	$5,21333 \cdot 10^{-6}$

Tabla 5.59. Coeficientes de la curva de regresión para R_a per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.96 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

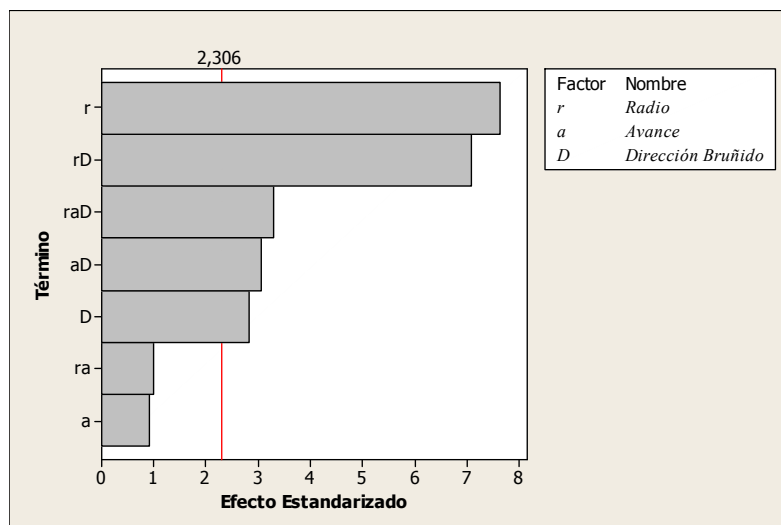


Figura 5.96. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

Para Ra medida en la dirección perpendicular, el radio de curvatura y la combinación de radio de curvatura + dirección del bruído son los parámetros más significativos. La velocidad de avance vuelve a perder protagonismo respecto a las piezas de aluminio.

Una vez más se eliminan los parámetros menos significativos del modelo y se pasa a hacer un segundo análisis. En el nuevo análisis y para un $R-Sq(adj) = 74,44\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.60.

Término	Coeficiente
Constante	0,400325
C1	-0,0018135
C2	0
C3	-0,1095
C4	0
C5	0,0016825
C6	0
C7	0

Tabla 5.60. Coeficientes de la curva de regresión para Ra per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.97 se puede observar que parámetros son significativos en el modelo reducido. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

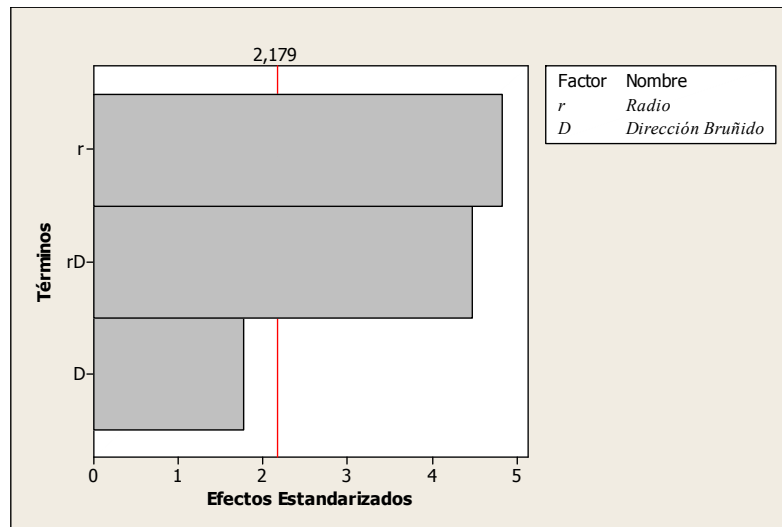


Figura 5.97. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el gráfico de la figura 5.98 se puede observar la influencia de la variación de cada parámetro sobre los valores de R_a resultantes.

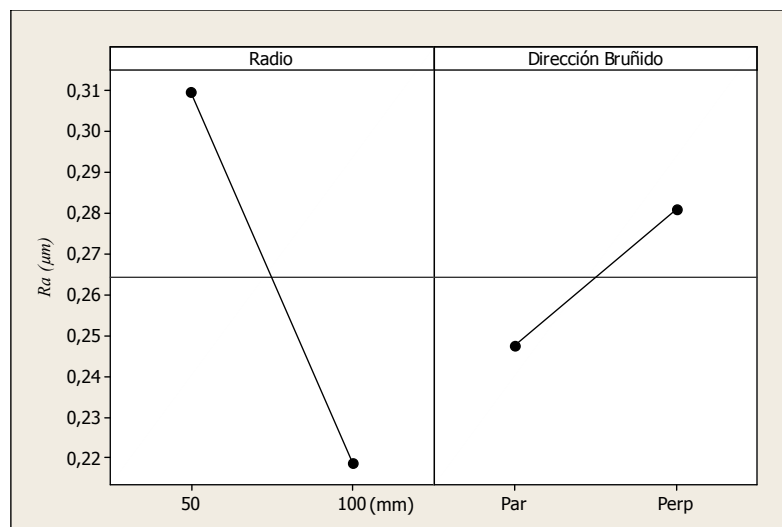


Figura 5.98. Efectos sobre R_a de las variables del proceso

Las tendencias son similares a las del resto de los indicadores de rugosidad, excepto en la influencia del radio de curvatura, donde en este caso los mejores valores de R_a se obtienen en el caso de superficies de radio 100 mm.

En el caso de R_t medida en el sentido perpendicular al avance de la fresa y para un $R\text{-Sq}(\text{adj}) = 94,65\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 5.61.

Término	Coeficiente
Constante	3,38701
C1	-0,0211513
C2	-0,00353492
C3	1,11271
C4	$4,33517 \cdot 10^{-5}$
C5	-0,00498133
C6	-0,00276092
C7	$2,94617 \cdot 10^{-5}$

Tabla 5.61. Coeficientes de la curva de regresión para R_t per.

En el diagrama de Pareto de la figura 5.99 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

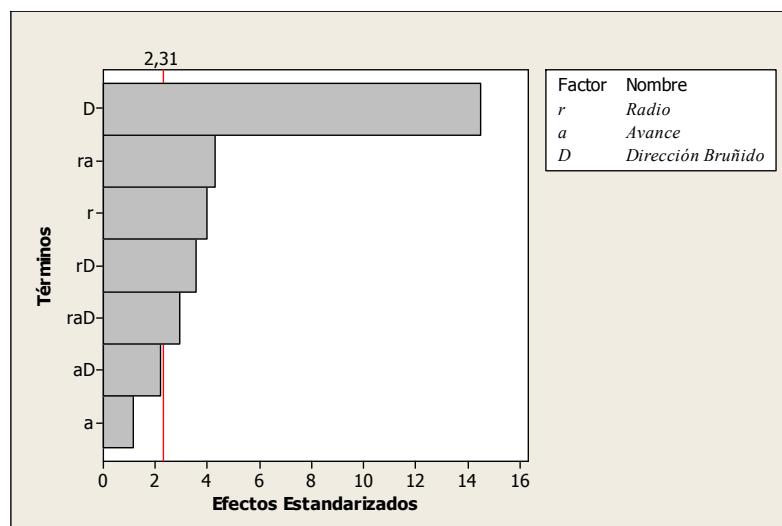


Figura 5.99. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

La dirección en que se realiza el bruído, la combinación de radio de curvatura + la velocidad de avance de la herramienta y el radio de curvatura son los parámetros que más influyen sobre los valores de R_t .

En el gráfico de la figura 5.100 se puede observar la influencia de la variación de los parámetros significativos sobre los valores de R_t resultantes.

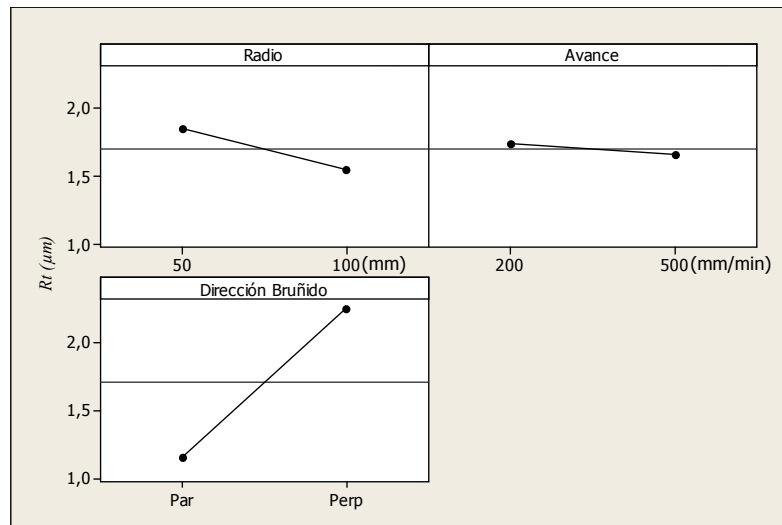


Figura 5.100. Efectos sobre R_t de las variables del proceso

Las tendencias también son similares a las que tienen los mismos parámetros para R_a .

5.8.2. Comentarios sobre los resultados del experimento

En una superficie cóncava de radio entre los 50 y 100 mm, fabricada de acero G10380, el proceso de bruñido también contribuye a mejorar la rugosidad superficial de las piezas ensayadas.

La dirección del bruñido y el radio de curvatura son los parámetros más significativos en el caso de este experimento. Este resultado es bastante similar a los obtenidos con las probetas convexas de este mismo material. La velocidad de avance no es significativa en este material.

Los mejores valores de rugosidad se obtienen para radio 50 en el sentido paralelo al avance del fresado y para radio 100 en el sentido perpendicular al avance del fresado.

Estos comentarios se pueden ver graficados en la figura 5.101.

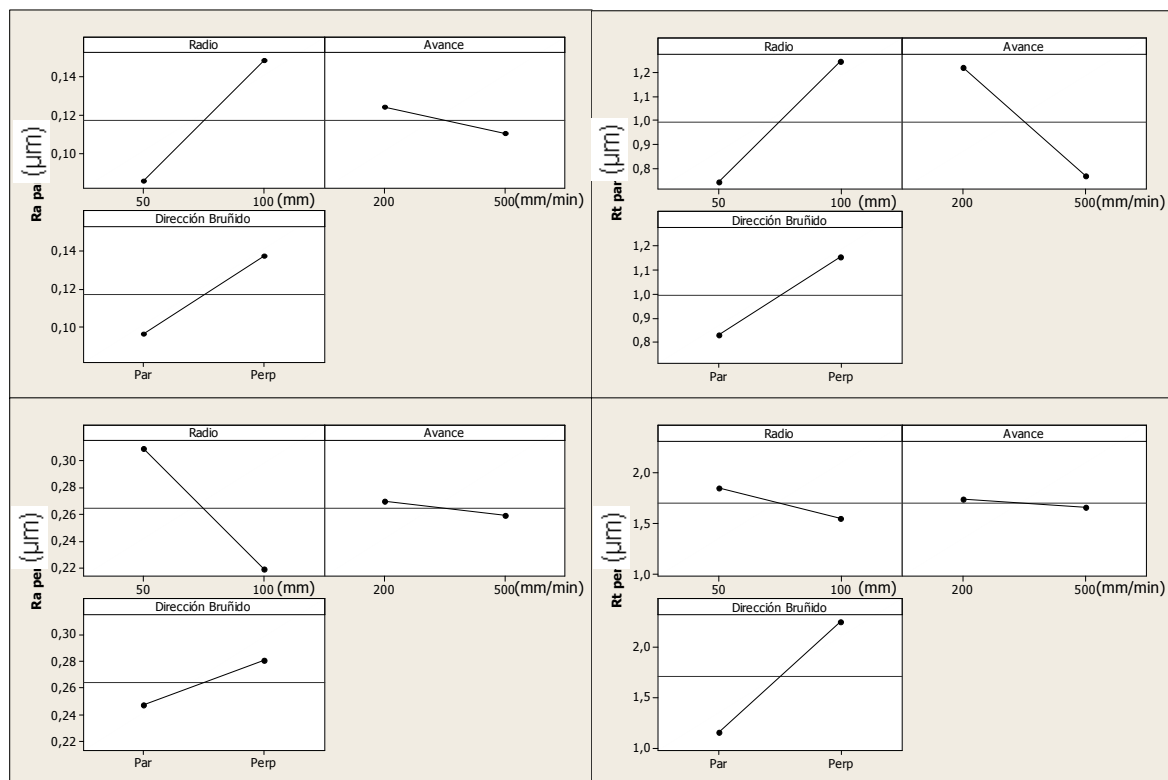


Figura 5.101. Resumen de los resultados de las mediciones de rugosidad para las probetas cóncavas de acero G10380

Respecto a los experimentos con las probetas cóncavas de aluminio A92017, la diferencia está además de en la influencia de la velocidad de avance que se denota en el aluminio comentada anteriormente, en que la dirección del bruñido en las mediciones de Ra y Rt hechas en el sentido perpendicular al avance del fresado actúan de manera opuesta en el acero.

Por otro lado si se comparan los resultados con los obtenidos para las probetas de Acero G10380 convexas, la diferencia se encuentra en que los mejores resultados para Ra y Rt medidos en el sentido paralelo al avance en las superficies convexas son mejores para el bruñido realizado en la dirección perpendicular al avance y en las superficies cóncavas los mejores resultados son para el bruñido realizado en el sentido paralelo al avance. También en el caso de las superficies cóncavas los mejores resultados de Ra y Rt medidas en el sentido perpendicular al fresado son para las superficies de radio 100 y en las probetas convexas para las superficies de radio 50. Esta última diferencia también se encontraba entre las probetas cóncavas y convexas de aluminio A92017.

5.9. Resumen de las mediciones de rugosidad superficial

De manera general ha quedado demostrado que el proceso de bruñido con bola es conveniente para ser utilizado en la mejora de la rugosidad superficial de superficies planas, cóncavas y convexas de acero y aluminio.

De todos los experimentos realizados se pueden extraer varias conclusiones interesantes para el desarrollo de futuros trabajos de bruñido de este tipo de superficies. Estas conclusiones a modo de recomendaciones se resumen en las tablas 5.62- 5.64.

	Material	A96351		A92017		G10380		
Parámetro	Indicador	NI	Valor óptimo	NI	Valor óptimo	NI	Valor óptimo	
Velocidad de avance	Ra par.	MS	300-400 mm/min	MS	1000 mm/min	NS		
	Rt par.				650 mm/min			
	Ra per.	NS						
	Rt per.	MS	Solo entre 300-500 mm/min. Para valores más pequeños NS					
Fuerza de bruñido	Ra par.	NS	2,5- 3,0 bar	S	1,5 mm penetración	NS		
	Rt par.	S	2,5 bar	NS				
	Ra per.	PS	2,5 bar	S	1,5 mm penetración			
	Rt per.	S	3 bar					
Rugosidad superficial previa	Ra par.	NE		NS		MS	Menor altura de cresta	
	Rt par.			NS				
	Ra per.			S	Menor altura de cresta			
	Rt per.							
Ancho pasada lateral	Ra par.	S	0,08 mm	NE		NE		
	Rt par.	NS						
	Ra per.	MS	0,08 mm					
	Rt per.	NS						

Tabla 5.62. Recomendaciones acerca de parámetros del proceso de bruñido a utilizar en las piezas planas

	Material	A96351		A92017		G10380	
Parámetro	Indicador	NI	Valor óptimo	NI	Valor óptimo	NI	Valor óptimo
Velocidad de avance	Ra par.	NE		NS	500 mm/s	NS	500 mm/s
	Rt par.						
	Ra per.			MS		MS	
	Rt per.					PS	
Radio de curvatura	Ra par.	NE		MS	50 mm	MS	50 mm
	Rt par.					S	
	Ra per.			PS		PS	
	Rt per.						
Estrategia de Bruñido	Ra par.	NE		NS	Perpendicular al fresado	MS	Perpendicular al fresado
	Rt par.					NS	
	Ra per.			PS		S	Paralelo al fresado
	Rt per.						

Tabla 5.63. Recomendaciones acerca de parámetros del proceso de bruñido a utilizar en las piezas convexas

	Material	A96351		A92017		G10380	
Parámetro	Indicador	NI	Valor óptimo	NI	Valor óptimo	NI	Valor óptimo
Velocidad de avance	Ra par	NE		S	500 mm/s	NS	500 mm/s
	Rt par			MS		S	
	Ra per			PS		NS	
	Rt per						
Radio de curvatura	Ra par	NE		S	100 mm	S	50 mm
	Rt par			NS		MS	
	Ra per			PS	100 mm		100 mm
	Rt per			NS		S	
Estrategia de Bruñido	Ra par	NE		MS	Perpendicular al fresado	PS	Paralelo al fresado
	Rt par				Paralela al fresado	S	
	Ra per				Perpendicular al fresado	PS	
	Rt per			S		MS	

Tabla 5.64. Recomendaciones acerca de parámetros del proceso de bruñido a utilizar en las piezas cóncavas

En las tablas 5.62 a 5.64, **NI**- Nivel de importancia

MS- Muy significativo

S - Significativo

PS- Poco significativo o significativo en combinación con otro parámetro

NS- No significativo

NE- Parámetro no evaluado

Capítulo 6. Experimentos para la comprobación de los valores añadidos del proceso de bruñido con bola

En el capítulo anterior ha quedado demostrado que el proceso de bruñido con bola mejora considerablemente la calidad superficial de las piezas en que se realiza. Esto es así tanto para piezas planas, como con superficies curvas cóncavas o convexas, con lo cual tiene una aplicación bastante amplia.

Además de mejorar la calidad superficial, el proceso de bruñido con bola aporta otros valores añadidos al material de la pieza en que se realiza. En primer lugar incrementa la dureza superficial, lo cual puede ser ventajoso para ciertas utilidades. En segundo lugar cambia el mapa de tensiones residuales que queda sobre las capas superficiales de la pieza, hecho que también puede resultar interesante para la variación de la vida útil del material a fatiga.

En los apartados sucesivos se demostrará a través de experimentos la veracidad de los planteamientos anteriores.

6.1. Medición de la dureza superficial

Se realizaron dos experimentos a partir de los cuales se midieron las durezas resultantes en las superficies bruñidas. Estos valores se compararon con los medidos en las superficies fresadas, para ver como afecta a este parámetro el proceso de bruñido con bola.

6.1.1. Primer experimento. Medición de dureza superficial en probetas de aluminio A96351

Se tomaron 3 probetas como las de la figura 6.1, fabricadas en aluminio A96351 y se midió la dureza superficial en cada zona bruñida de las mismas. También se realizó la misma operación en las zonas fresadas. El proceso de bruñido en cada zona se realizó con diferentes parámetros, como fue descrito en el primer experimento del capítulo anterior. Se han utilizado estos parámetros también como variables, para analizar como influyen los mismos en los resultados definitivos de la dureza superficial. Las características del ensayo de dureza realizado se muestran en la tabla 6.1.



Figura 6.1. Probetas de aluminio A 96351 utilizadas en el experimento de medición de dureza

Escala de dureza medida	HRH
Pre-carga	10 kgf
Pre-carga + carga	60 kgf
Sensibilidad	20 μm /unidad
Diámetro del indentador	1/8"

Tabla 6.1. Características del ensayo de dureza superficial realizado

Es conveniente remarcar que la superficie a bruñir de la pieza de trabajo de cada probeta fue planeada utilizando para ello una fresa frontal de $\varnothing 80$ mm y 5 plaquitas, con los siguientes parámetros: Velocidad de rotación del husillo= 1000 min^{-1} , Velocidad de Avance= 200 mm/min , Profundidad de corte= 0.5 mm .

Por otro lado los parámetros utilizados como variables del proceso de bruñido son: El paso lateral de la operación p , la profundidad de penetración del cabezal de la herramienta t , (parámetro que está relacionado con la fuerza a aplicar) y la velocidad de avance de la herramienta de bruñido a . La combinación de los parámetros da como resultado 8 experimentos, con dos réplicas cada uno y 4 puntos centrales, lo cual hace un total de 20 experimentos diferentes.

Los resultados de las mediciones se pueden observar en la tabla 6.2.

Pruebas	p (mm)	t (mm)	a (mm/min)	Dureza HRH	Error total (%)
1	0,080	0,50	100	83,5	1,3
2	0,150	0,50	100	83,3	1,3
3	0,080	1,00	100	84,7	1,1
4	0,150	1,00	100	83,6	1,0
5	0,080	0,50	200	84,3	1,1
6	0,150	0,50	200	84,4	1,3
7	0,080	1,00	200	83,8	1,0
8	0,150	1,00	200	84,8	1,1
9	0,080	0,50	100	83,2	0,9
10	0,150	0,50	100	83,2	1,3
11	0,080	1,00	100	84,2	1,2
12	0,150	1,00	100	83,4	1,2
13	0,080	0,50	200	84,7	0,9
14	0,150	0,50	200	84,9	0,9
15	0,080	1,00	200	84,1	1,0
16	0,150	1,00	200	84,6	1,2
17	0,115	0,75	150	83,2	0,9
18	0,115	0,75	150	84,7	1,2
19	0,115	0,75	150	84,5	1,0
20	0,115	0,75	150	83,9	0,9
Fresado				80,9	1,4

Tabla 6.2. Resultados de las pruebas de Dureza

Estos valores de dureza fueron tomados como la media de una muestra de 9 valores en cada prueba. El tamaño de la muestra es de 9, ya que es el adecuado en todas las pruebas para que el error no supere el error cometido en las mediciones de la dureza en las superficies fresadas y de esta manera se pueda considerar los valores obtenidos como fiables. El tratamiento estadístico de esta información se puede encontrar en el anexo 8. El error total de la medición expresado en la tabla 6.2, es el resultado de la suma del error de precisión de la medida que se comete, más el error del objetivo del durómetro, más error estadístico de la medición.

Como se puede observar en la tabla de resultados (tabla 6.2), independientemente del valor de los parámetros con los que se haga, el valor de la dureza superficial aumenta respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, de media un 4 %.

En este caso será posible estimar el valor de dureza superficial que se debe obtener utilizando los parámetros evaluados, por medio de la siguiente curva de regresión:

$$HRH = \text{Constante} + C1p + C2t + C3a + C4pt + C5pa + C6ta + C7pta \quad (1)$$

En este caso para un **R-Sq(adj) = 57,21%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 6.3.

Término	Coeficiente
Constante	77,3849
C1	25,3968
C2	10,6349
C3	0,0413095
C4	-63,4921
C5	-0,15873
C6	-0,0662698
C7	0,404762

Tabla 6.3. Coeficientes de la curva de regresión para Ra par.

En el diagrama de Pareto de la figura 6.2 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

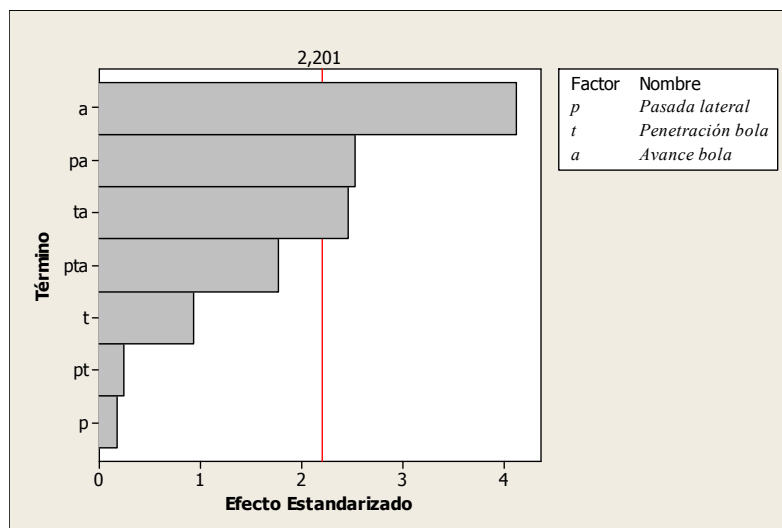


Figura 6.2. Diagrama de Pareto para efectos estandarizados

En el diagrama de Pareto anterior se puede observar que los parámetros significativos para los valores medidos de dureza superficial son el ancho lateral entre pasadas, y las combinaciones entre el ancho lateral entre pasadas y el avance de la bola y entre el mismo y la penetración del cabezal de la máquina. No obstante parece ser que el único parámetro verdaderamente significativo es la

velocidad de avance de la herramienta, ya que el hecho de que sean significativas las otras dos combinaciones, es precisamente por la influencia que ejerce la velocidad de avance, cuya importancia relativa dentro del modelo es del orden del 40%. Esto sería coherente con los resultados obtenidos para la rugosidad superficial relatados en el capítulo anterior, e incluso con el modelo físico del capítulo 4. La dureza es función de la tasa de velocidad de deformación del material y este depende de la velocidad con la que se realice el proceso o lo que es lo mismo la velocidad de avance de la herramienta.

Para analizar si el parámetro velocidad de avance es realmente el más importante se hace un análisis de correlación de los datos. Con un nivel de confianza del 95 % se tratan los datos y dan como resultado lo que se muestra en el gráfico de la figura 6.3.

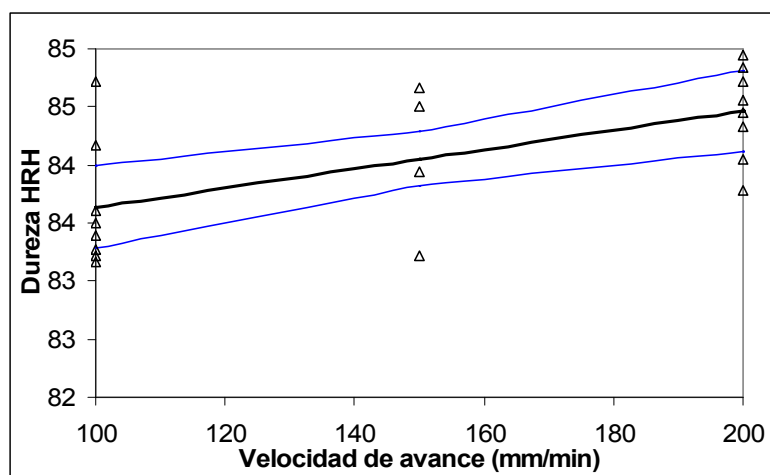


Figura 6.3. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para HRH

Para un **R-Sq = 99,40%** la prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F1= 11,0795$ y el $F2= 4,41387$. Si $F1 > F2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el experimento. De esta manera se puede afirmar para el parámetro que es significativo sobre los valores de HRH (la velocidad de avance de la bola), que existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos.

En este caso los coeficientes de la curva de correlación (1) del modelo reducido se pueden ver en la tabla 6.4.

Término	Coeficiente
Constante	82,8132
C1	0
C2	0
C3	0,0083
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 6.4. Coeficientes de la curva de regresión para el modelo reducido de HRH

El intervalo de confianza de los valores obtenidos es de $\pm 0,8164$ y para la constante $\pm 0,0052$.

En el gráfico de la figura 6.4 se puede observar la influencia de la variación de la velocidad de avance sobre los valores de dureza superficial medidos.

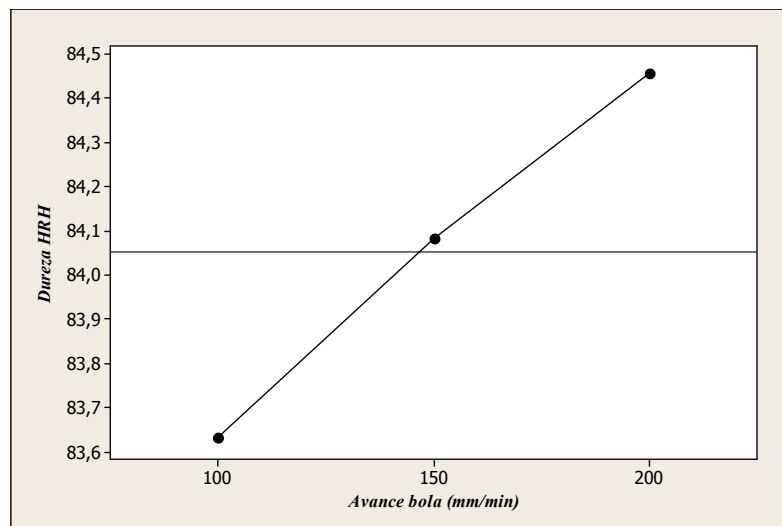


Figura 6.4. Efectos sobre Ra de las variables significativas del proceso

6.1.1.1. Comentarios sobre los resultados del primer experimento

Se puede observar claramente que para lograr superficies con mayor dureza el avance de la herramienta debe ser mayor. Este comportamiento es coherente comparado con el análisis del modelo físico obtenido. Si la velocidad de deformación es mayor, el efecto de autoendurecimiento del material aumenta, con lo cual se obtienen superficies más endurecidas después de ser bruñidas.

6.1.2. Segundo experimento. Medición de micro-dureza en probetas convexas de aluminio A92017

Con el objetivo de comprobar si el proceso de bruñido también aumenta la dureza en superficies curvas, se toma una probeta como la representada en la figura 6.5 con una superficie convexa, fabricadas en aluminio A92017 y se mide la micro dureza en la superficie de la misma, en cada zona bruñida. También se realizó la misma operación en las zonas fresadas. El proceso de bruñido en cada zona se realizó con diferentes parámetros, como fue descrito en el quinto experimento del capítulo anterior. Se han utilizado estos parámetros también como variables, para analizar como influyen los mismos en los resultados definitivos de la dureza superficial. Las características del ensayo de dureza realizado se muestran en la tabla 6.5.

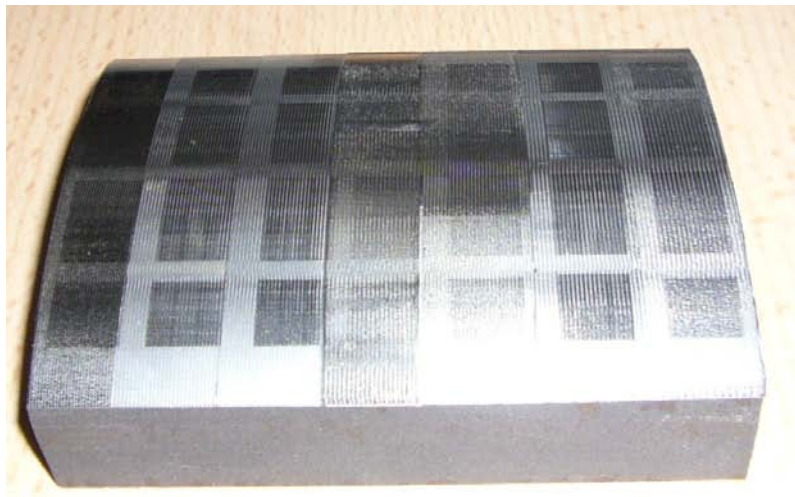


Figura 6.5. Probetas de aluminio A96351 utilizadas en el experimento de medición de micro dureza

Escala de micro dureza medida	<i>HV</i>
Pre-carga	10 kgf
Pre-carga + carga	0,3 kgf
Sensibilidad	20 μm /unidad
Diámetro del identador	1/8"

Tabla 6.5. Características del ensayo de dureza superficial realizado

Los parámetros utilizados como variables del proceso de bruñido son: el radio de curvatura de la superficie a bruñir r , la velocidad de avance de la herramienta de bruñir a y la estrategia de mecanizado utilizada que se concreta en cambiar la dirección con la que se hace el bruñido D . Esta última se realiza paralela a la dirección del avance del fresado (Par.) o perpendicular a este (Per.). La combinación de los parámetros da como resultado 8 experimentos.

Los resultados de las mediciones se pueden observar en la tabla 6.6.

Pruebas	R (mm)	a (mm/min)	D	Micro dureza HV	Error total (%)
1	50	200	Par.	125,5	4,6
2	100	200	Par.	178,5	11,4
3	50	350	Par.	127,3	8,3
4	100	350	Par.	138,5	12,6
5	50	200	Per.	136,6	13,9
6	100	200	Per.	186,3	7,8
7	50	350	Per.	130,0	7,9
8	100	350	Per.	141,6	5,9
Fresado				119,9	8,6

Tabla 6.6. Resultados de las pruebas de micro dureza

Como se puede observar en la tabla de resultados (tabla 6. 6), independientemente del valor de los parámetros con los que se haga, el valor de la micro dureza superficial aumenta respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, de media un 4,2%.

En este caso será posible estimar el valor de micro dureza superficial que se debe obtener utilizando los parámetros evaluados, por medio de la expresión (2).

$$HV = \text{Constante} + C1r + C2a + C3D + C4ra + C5rD + C6aD + C7raD \quad (2)$$

Para un **R-Sq(adj) = 67,48%**, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 6.7.

Término	Coeficiente
Constante	29,6333
C1	2,09233
C2	0,250333
C3	15,2667
C4	-0,00532667
C5	-0,0823333
C6	-0,0403333
C7	0,000246667

Tabla 6.7. Coeficientes de la curva de regresión para HV

En el diagrama de Pareto de la figura 6.6 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

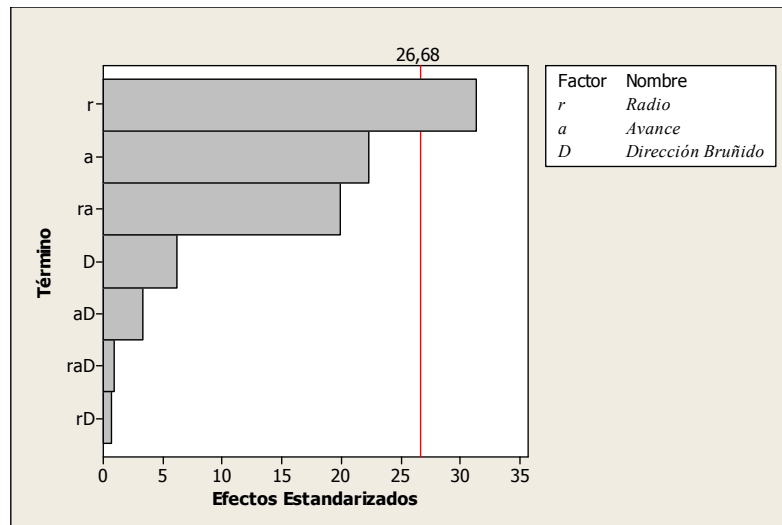


Figura 6.6. Diagrama de Pareto para los efectos de los parámetros sobre HV

En el diagrama de Pareto anterior se puede observar que el único parámetro significativo para los valores medidos de micro dureza superficial es el radio de curvatura de la superficie. En este caso pesa más este efecto que la velocidad de avance, producto de que la componente de fuerza de bruñido que actúa a lo largo de la superficie varía su valor producto de la inclinación de esta que también va cambiando. Aunque la velocidad de avance no es un parámetro significativo, si que tiene una cierta importancia relativa dentro del análisis, como se puede observar en el gráfico de Pareto de la figura anterior. Esto es lógico teniendo en cuenta que la velocidad de avance adquiere importancia en este material según lo que se ha demostrado en experimentos anteriores.

Para el radio de curvatura de la superficie, se podría hacer entonces un análisis de correlación como se ha hecho en el apartado anterior. Para este nuevo análisis y con un **R-Sq = 71,33 %**, los coeficientes de la ecuación (2) resultante se reflejan en la tabla 6.8.

Término	Coeficiente
Constante	98,4750
C1	0,6275
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 6.8. Coeficientes de la curva de regresión para el modelo reducido de HV

La prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F1= 6,218$ y el $F2= 5,98738$. Si $F1 > F2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el experimento. De esta manera se puede afirmar que para el parámetro que es significativo sobre los valores de HV (el radio de curvatura de la pieza), existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos. El intervalo de confianza de los valores obtenidos es de $\pm 48,6796$ y para la constante $\pm 0,6158$. Los resultados del análisis se muestran en el gráfico de la figura 6.7.

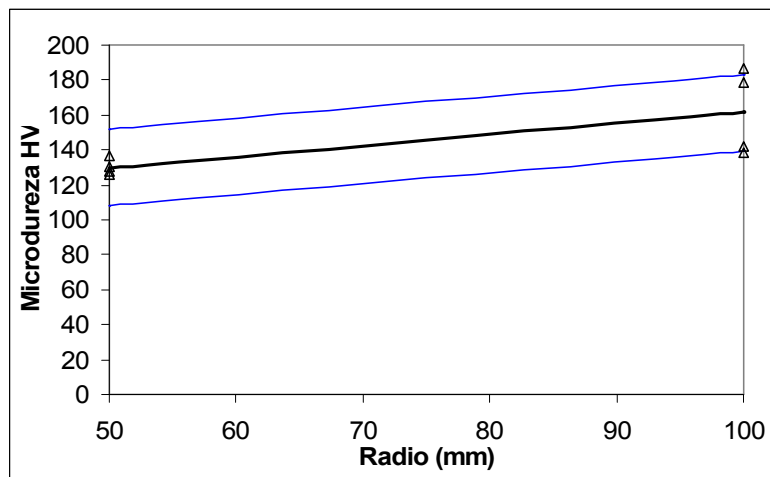


Figura 6.7. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para HV

En el gráfico de la figura 6.8 se puede observar la influencia de la variación del radio de curvatura de la superficie de la pieza sobre los valores de micro dureza superficial medidos.

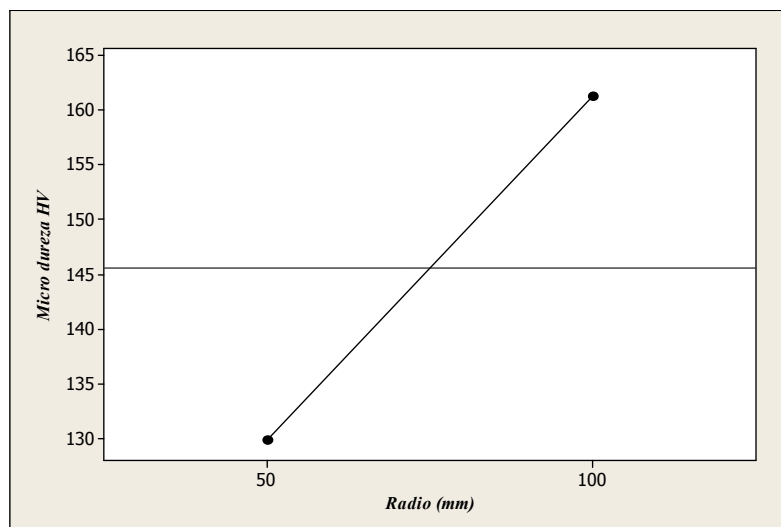


Figura 6.8. Efectos sobre la micro dureza de la variación del radio de curvatura de la superficie de la pieza

6.1.2.1. Comentarios sobre los resultados del segundo experimento

Se puede observar claramente que los valores de micro dureza se incrementan más respecto a los de la pieza antes de bruñir, sobre todo en la superficie de radio 100 mm. El radio, como hemos visto anteriormente es el único significativo. Al aumentar el radio aumentan los valores de microdureza ya que la componente de fuerza que actúa sobre la superficie en un radio mayor, es más elevada que en un radio más pequeño, con lo cual la herramienta realiza más fuerza sobre la superficie de la pieza bruñir en superficies de radio 100 que en superficies de radio 50 mm.

6.1.3. Tercer experimento. Medición de micro-dureza en probetas convexas de acero G10380

Se realiza un tercer experimento con las mismas condiciones que el anterior, pero en piezas fabricadas en acero G10380 (figura 6.9). Las características del ensayo de micro dureza realizado se muestran en la tabla 6.9.

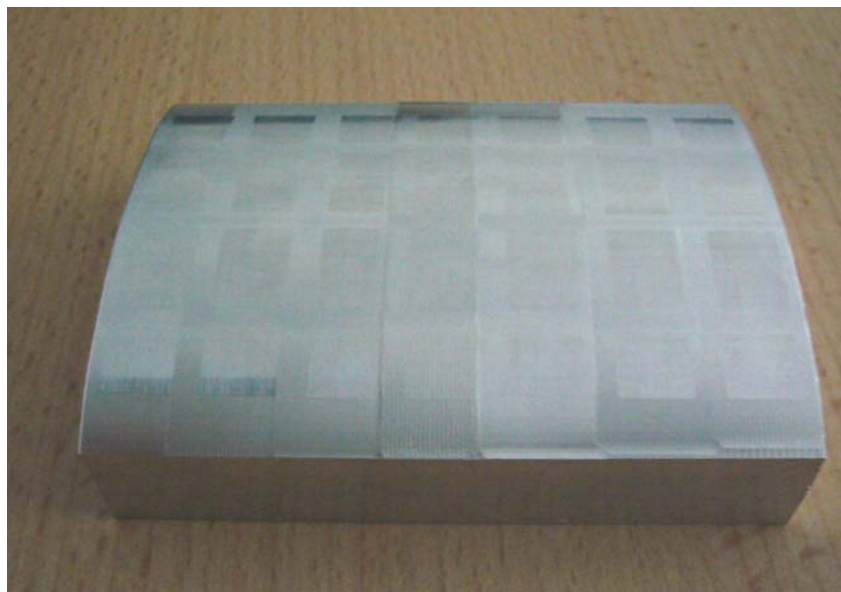


Figura 6.9. Probetas de acero G10380 utilizadas en el experimento de medición de micro dureza

Escala de micro dureza medida	<i>HV</i>
Pre-carga	10 kgf
Pre-carga + carga	0,3 kgf
Sensibilidad	20 μ m/unidad
Diámetro del indentador	1/8"

Tabla 6.9. Características del ensayo de micro dureza superficial realizado

Los parámetros utilizados como variables del proceso de bruñido son los mismos que para el experimento anterior. Se realizan también 8 experimentos. Los resultados de las mediciones se pueden observar en la tabla 6.10.

Pruebas	R (mm)	a (mm/min)	D	Micro dureza HV	Error total (%)
1	50	200	Par.	290,2	2,0
2	100	200	Par.	324,2	10,4
3	50	350	Par.	279,0	4,8
4	100	350	Par.	326,7	8,7
5	50	200	Per.	261,3	17,0
6	100	200	Per.	355,3	1,9
7	50	350	Per.	242,6	10,2
8	100	350	Per.	374,7	18,5
Fresado				254,3	7,6

Tabla 6.10. Resultados de las pruebas de micro dureza

Como se puede observar en la tabla de resultados (tabla 6.10), independientemente del valor de los parámetros con los que se haga, el valor de la micro dureza superficial aumenta respecto a la que ha quedado en la superficie producto de la operación de fresado previo, de media un 11,3 %.

En este caso será posible estimar el valor de micro dureza superficial que se debe obtener utilizando los parámetros evaluados, al igual que en el experimento anterior por medio de la curva de regresión (2).

Para un $R-Sq(adj) = 67,48\%$, los coeficientes tomarían los valores de la tabla 6.11.

Término	Coeficiente
Constante	293,450
C1	0,244
C2	-0,4085
C3	-12,55
C4	0,00518
C5	0,112
C6	-0,1595
C7	0,00244

Tabla 6.11. Coeficientes de la curva de regresión para HV

En el diagrama de Pareto de la figura 6.10 se puede observar que parámetros son significativos para los resultados medidos. (Mediciones para un nivel de confianza del 95%)

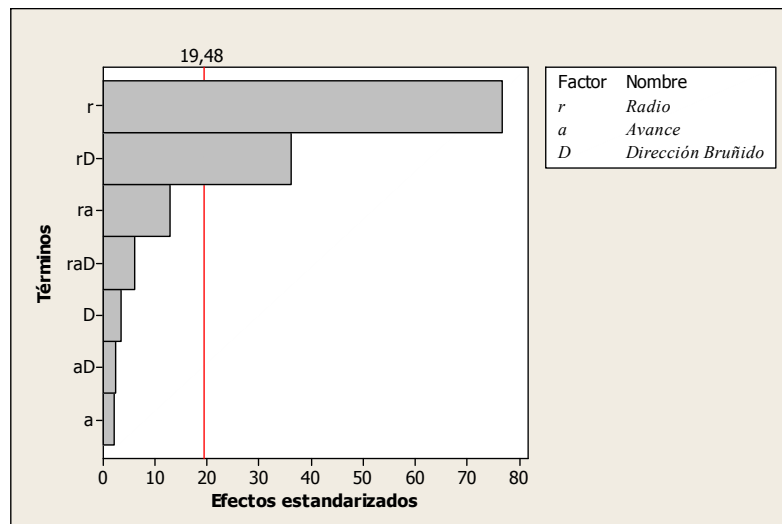


Figura 6.10. Diagrama de Pareto para los efectos de los parámetros sobre HV

En el diagrama de Pareto anterior se puede observar que los parámetros más significativos para los valores medidos de dureza superficial son el radio de curvatura de la superficie y la combinación de éste con la dirección en que se realiza el bruñido. Al igual que en el experimento anterior el efecto cruzado del radio de curvatura y la dirección de bruñido, aparece como significativo porque el radio tiene una importancia relativa muy alta, del orden de 80%, porque la dirección de bruñido tiene una importancia relativa del orden del 5%. Por esta razón, para comprobar si realmente el único parámetro significativo es el radio de curvatura de la superficie, se hace un análisis de correlación, eliminando los parámetros no significativos. Para este nuevo análisis y con un **R-Sq = 99,11 %**, los coeficientes de la ecuación (2) resultante se reflejan en la tabla 6.12.

Término	Coeficiente
Constante	191,325
C1	1,5390
C2	0
C3	0
C4	0
C5	0
C6	0
C7	0

Tabla 6.12. Coeficientes de la curva de regresión para el modelo reducido de HV

La prueba de significación de la correlación da que el F de Fischer $F1= 23,227$ y el $F2= 5,98738$. Si $F1 > F2$, significa que hay correlación entre los datos obtenidos en el experimento. De esta manera se puede afirmar que para el parámetro que es significativo sobre los valores de HV (el radio de curvatura de la pieza), existe correlación entre sus valores y los resultados obtenidos. El intervalo de confianza de los valores obtenidos es de $\pm 61,7724$ y para la constante $\pm 0,7814$. Los resultados del análisis se muestran en el gráfico de la figura 6.11.

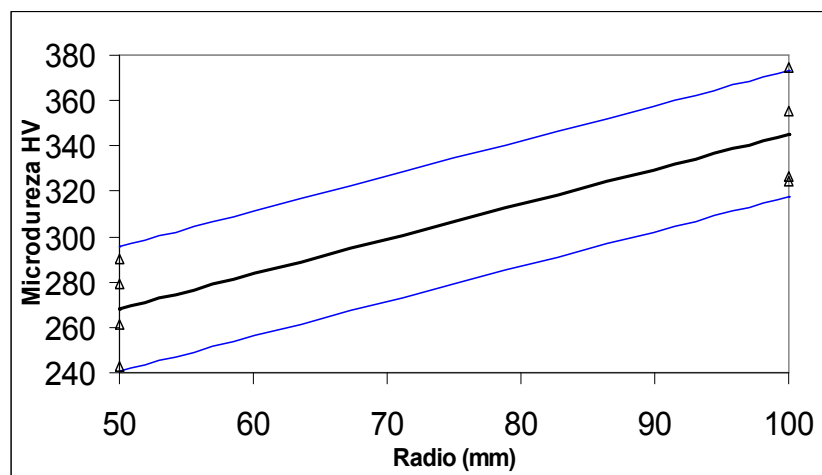


Figura 6.11. Gráfica regresión lineal e Intervalo de Confianza para HV

En el gráfico de la figura 6.12 se puede observar la influencia de la variación del radio de curvatura de la superficie de la pieza sobre los valores de micro dureza superficial medidos.

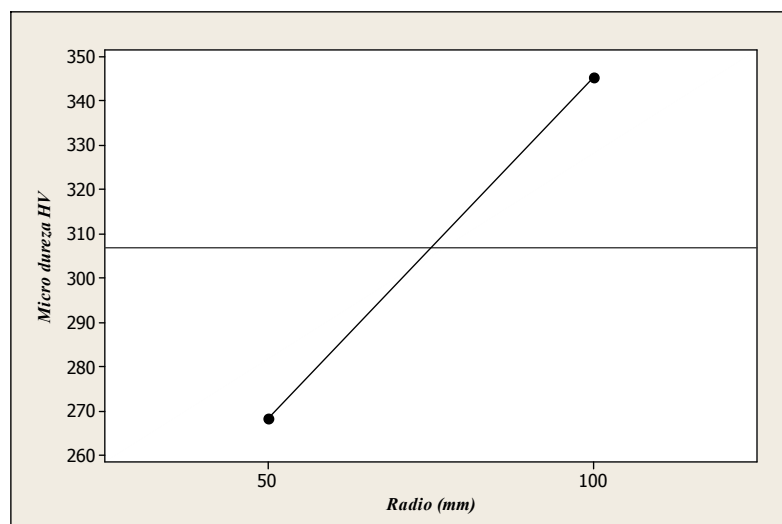


Figura 6.12. Efectos sobre la micro dureza de la variación del radio de curvatura de la superficie de la pieza

6.1.3.1. Comentarios sobre los resultados del tercer experimento

Se puede observar en el gráfico anterior que los mayores valores de dureza se obtienen en la superficie de radio 100 mm, como para el aluminio del experimento anterior. El avance deja de tener importancia, como era de esperar para el caso de este material. Esto es coherente con los resultados de las mediciones de rugosidad superficial y con el modelo físico desarrollado para el análisis del bruñido con bola.

6.2. Comentarios sobre los resultados de las mediciones de la dureza superficial

Como se puede observar en los tres experimentos anteriores el proceso de bruñido contribuye a incrementar la dureza superficial de las piezas en las que se realiza. Se ha demostrado para los tres materiales en estudio y para superficies planas y curvas. Este resultado es bueno, ya que aumentando la dureza superficial de un material, se aumenta la resistencia al desgaste del mismo. Este hecho puede ser muy importante para una gran cantidad de piezas en las cuales se podría aplicar un proceso de bruñido con bola no solamente para mejorar su acabado superficial, sino también para aumentar su resistencia al desgaste.

Los resultados tienen cierta relación con los obtenidos para la rugosidad superficial, ya que en el aluminio se sigue observando una cierta influencia de las velocidades de avances sobre los resultados en este caso de dureza. Cabe recordar que el autoendurecimiento del material es una función de la velocidad con la que se deforma el mismo.

Por otra parte en las probetas convexas el parámetro que más influencia tiene sobre los valores de dureza es el radio de curvatura, cosa que también sucede en los resultados de rugosidad superficial.

Estos aspectos son coherentes también con el modelo físico propuesto en el capítulo 4. En este modelo el número adimensional de bruñido B , que da una idea de la fuerza que es necesaria aplicar durante el proceso de bruñido, está influenciado por la geometría de la pieza que se trabaja. Esto es así ya que la fuerza es función de la presión de trabajo y del área de contacto entre la bola y la pieza. Por otro lado la fuerza de bruñido es también función de la velocidad con la que se deforma el material.

Los parámetros del sistema recomendados en cada caso se pueden resumir en la tabla 6.13.

Material/ Tipo de probeta /Escala de dureza medida	A96351 / Planas / <i>HRH</i>		A92017 / Convexas / <i>HV</i>		AISI 1038 / Convexas / <i>HV</i>	
Parámetro	NI	Valor óptimo	NI	Valor óptimo	NI	Valor óptimo
Velocidad de avance	MS	200 mm/min	PS	200 mm/min	NS	200 mm/min
Penetración Cabezal	PS	1 mm	NE		NE	
Ancho de pasada lateral	NS		NE		NE	
Radio de curvatura	NE		MS	100 mm	MS	100 mm
Estrategia de Bruñido	NE		NS	Perpendicular al fresado	PS	Perpendicular al fresado

Tabla 6.13. Resumen de los parámetros recomendados para el proceso de bruñido

Donde:

NI- Nivel de importancia

MS- Muy significativo

PS - Poco Significativo

NS- No significativo

NE- Parámetro no evaluado

6.3. Mediciones de las tensiones residuales en probetas convexas de aluminio A96351

Con el objetivo de verificar que ha pasado en las capas internas del material de las piezas que han sido bruñidas, se realizan mediciones de las tensiones residuales que han quedado después del proceso. Para ello se han tomado dos muestras de la probeta convexa de aluminio A96351. Las superficies de estas muestras tienen radios de curvatura de 100 y 50 mm respectivamente.

Las tensiones residuales internas de la estructura de un material son aquellas que existen en él cuando no hay sollicitaciones o cargas externas. Los procesos de deformación plástica son las causas más comunes que provocan tensiones residuales, aunque en realidad todos los procesos de fundición, soldadura, mecanizado, moldeado, tratamientos térmicos, etc.; introducen tensiones residuales en los materiales. En algunas ocasiones, las tensiones residuales pueden ser introducidas también más tarde a lo largo de la vida del material por procedimientos de instalación o montaje, por sobrecargas ocasionales, por efectos de asentamiento del suelo o estructuras subterráneas, o por cargas muertas que puedan llegar a ser parte integrante de la estructura.

Los efectos de las tensiones residuales pueden ser beneficiosos o perjudiciales, dependiendo de la magnitud, sentido, y distribución de estas tensiones con respecto a las tensiones inducidas por cargas.

Para medir tensiones residuales existen diferentes métodos y ensayos. Entre los más utilizados están el método del taladro, el de ruido de Barkhausen y la difracción de rayos x.

De las técnicas citadas, la difracción de rayos x es el método más aceptado para la medida no destructiva de tensiones residuales en materiales cristalinos. La medida de deformaciones por difracción de rayos x, no requiere relajación de tensiones y ofrece una alternativa no destructiva a otros métodos.

Con esta técnica, se mide la deformación de la red cristalina y la tensión se determina a partir de las constantes elásticas de difracción. Los rayos x inciden en un área de la superficie de la muestra, que engloba típicamente un número elevado de granos cristalinos (dependiendo de la geometría del haz y el tamaño de grano del material). Además, estos penetran una cierta distancia en el material, que depende de la longitud de onda de la radiación incidente, el material y el ángulo de incidencia.

Según la ley de *Bragg* (3), pueden ser estudiadas las direcciones en las que la difracción de rayos x sobre la superficie de un cristal produce interferencias, dado que esta permite predecir los ángulos en los que los rayos x son difractados por un material con estructura atómica cristalina.

$$m\lambda = 2d \sin(\alpha) \quad (3)$$

Donde:

λ - Longitud de onda de los rayos x

m - Orden. Número entero de longitudes de onda que hay entre rebotes

d - Distancia entre los planos de la red cristalina

α - Ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión

Para cada material se puede determinar cual es el pico de difracción correspondiente al ángulo de difracción, que mayor intensidad y resolución aporta. Este pico se puede medir para los ángulos de inclinación de los diferentes cristales φ , respecto a la superficie de la pieza, o lo que es lo mismo aparece un pico de difracción asociado a cada plano de difracción que se mida. En el caso de este material el ángulo de difracción donde aparece el pico de mayor intensidad es $2\alpha=112^\circ$. En los gráficos de la figuras 6.13 y 6.14 se pueden observar, para las probetas 1 y 2 respectivamente, las amplitudes de los picos de difracción para este ángulo. La amplitud de los picos de difracción está relacionada con el estado tensional de los planos del material. Los valores se toman para una longitud de onda de la radiación de $\lambda=0,1541874$ nm.

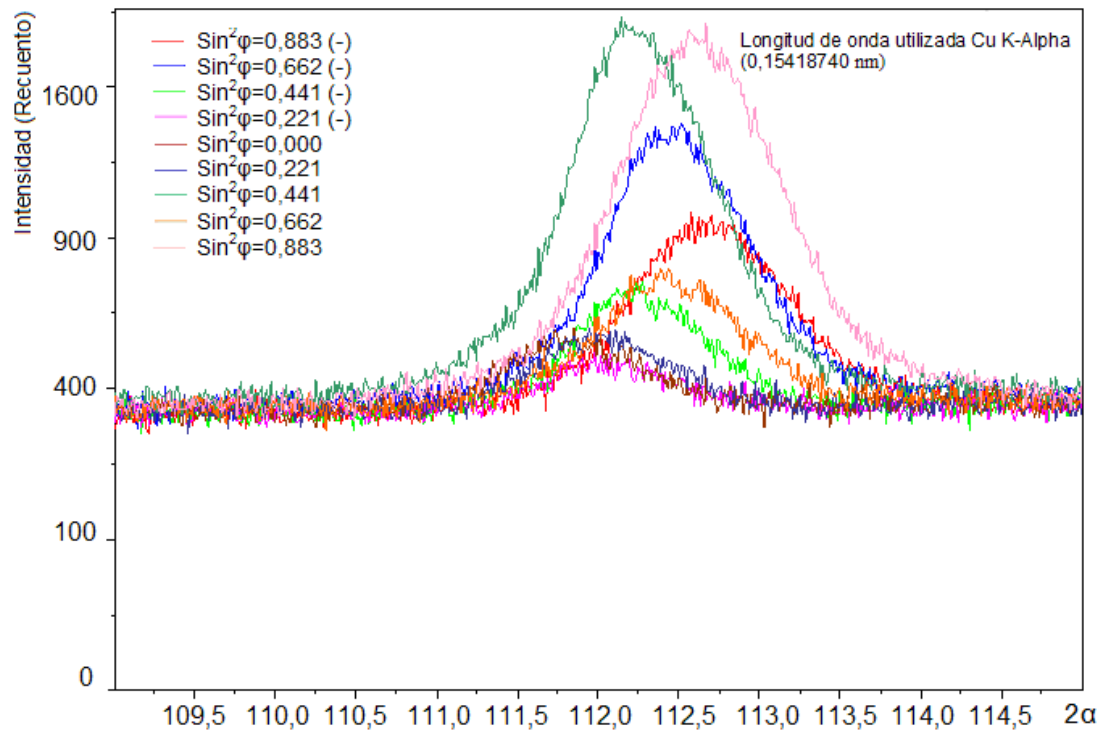


Figura 6.13. Variación del ángulo para diferentes intensidades de radiación para la probeta 1. (aluminio A96351, superficie de radio 100 mm de curvatura)

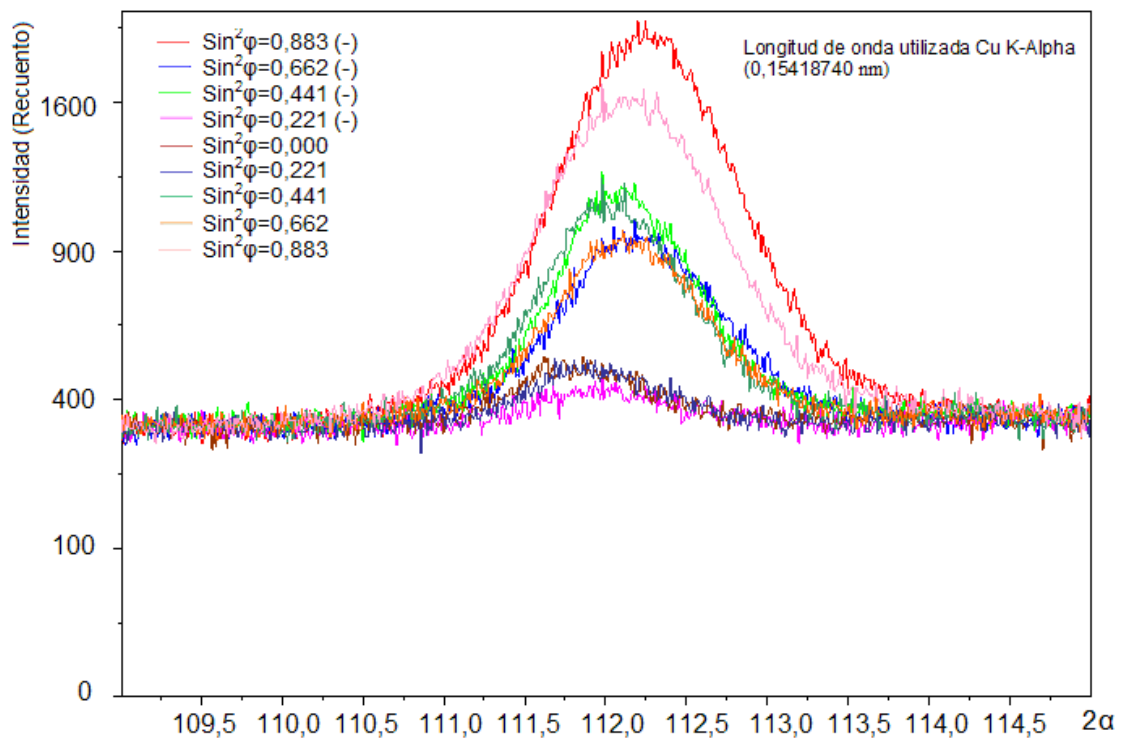


Figura 6.14. Variación del ángulo para diferentes intensidades de radiación para la probeta 1. (aluminio A96351, superficie de radio 50 mm de curvatura)

A partir de la ley de *Bragg* se pueden medir las distancias entre los planos de las redes cristalinas y se puede encontrar una relación entre la distancia entre planos de difracción (d), y del seno del ángulo de inclinación de los diferentes cristales φ . En las figuras 6.15 y 6.16, se pueden observar éstos gráficos, para ambas probetas. Los puntos triangulares representan los valores para los ángulos φ positivos y los puntos cuadrados para los ángulos negativos. La línea representa la tendencia estimada para dichos valores. Para un valor de $\varphi = 0^\circ$, se ha determinado el valor de las tensiones residuales, a través del método del centro de gravedad. Este cálculo es posible ya que las tensiones son proporcionales de las deformaciones en la forma de la ecuación (4).

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4)$$

Donde:

σ - Tensión residual en el material

E - Módulo de *Young* del material

ε - Deformación medida en el material

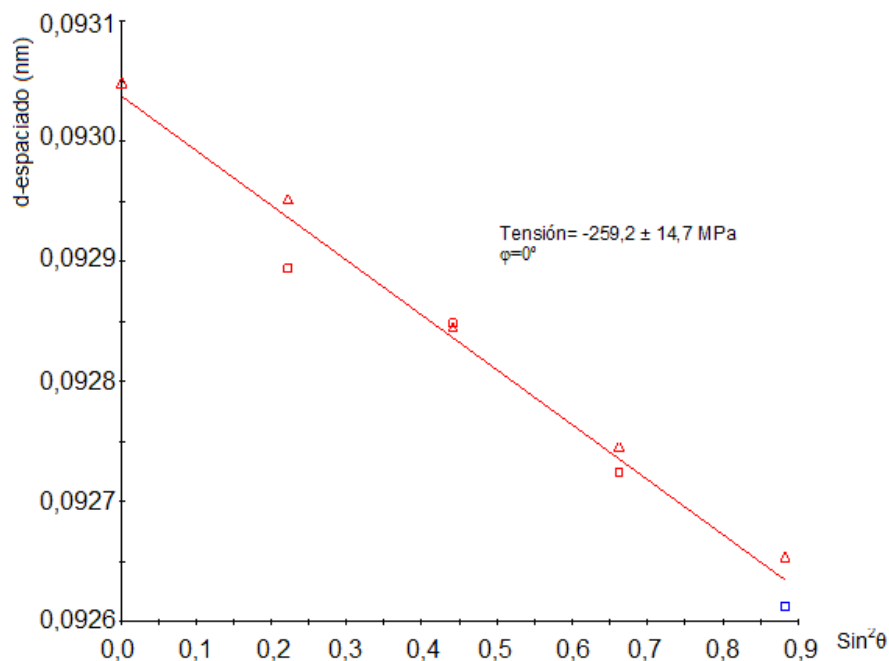


Figura 6.15. Variación de las distancias entre planos d , en función del seno del ángulo θ y valor obtenido de tensiones residuales, para la probeta 1. (aluminio A96351, superficie de radio 100 mm de curvatura)

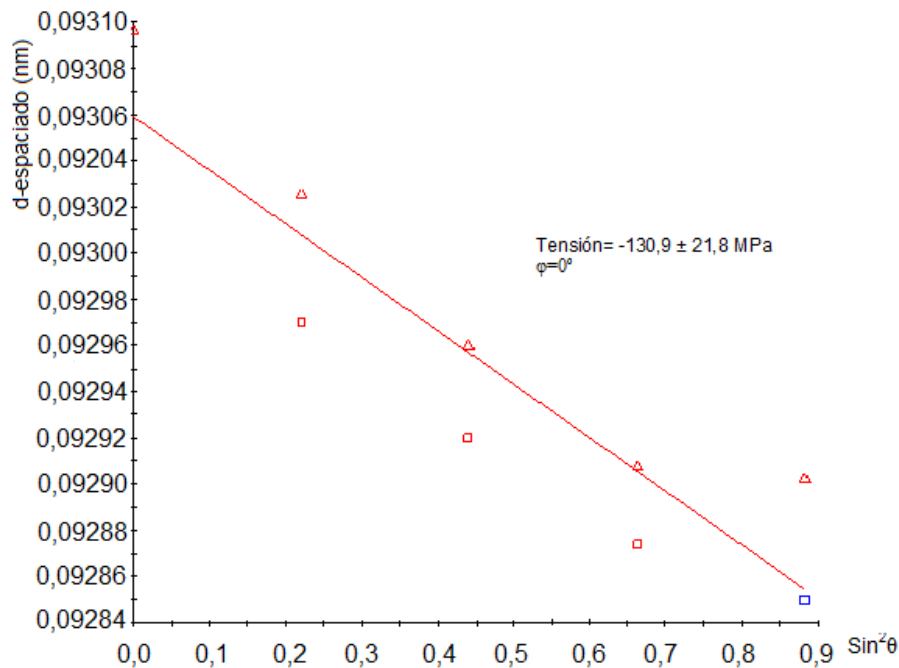


Figura 6.16. Variación de las distancias entre planos d , en función del seno del ángulo θ y valor obtenido de tensiones residuales, para la probeta 2. (aluminio A96351, superficie de radio 50 mm de curvatura)

6.3.1. Comentarios sobre los resultados del experimento

Como se puede observar en los gráficos anteriores los valores obtenidos son de -259,2 MPa y -130,9 MPa, respectivamente. El signo negativo representa que estas tensiones son de tipo compresivas. El hecho de que sean compresivas es beneficioso producto de que ayudan a aumentar la vida útil de la pieza a fatiga. Este comportamiento se da en ambas probetas, independientemente de su radio de curvatura. En ambas superficies los valores de los parámetros utilizados en el proceso coinciden. Es decir son superficies bruñidas con una velocidad de avance de 300 mm/min, en la dirección paralela al avance del fresado previo, con ancho de pasada lateral de 0,15 mm y con una profundidad de penetración del cabezal de la herramienta de 1 mm. La única diferencia entonces entre las superficies bruñidas es su radio de curvatura.

A partir de los resultados obtenidos se observa que en la superficie de radio 100 mm las tensiones residuales tienen un valor mayor, lo cual quiere decir que la distancia entre los planos ha disminuido. Este resultado es coherente con el de la medición de dureza superficial.

6.4. Análisis microscópico de la pieza bruñida

Con la intención de ver que sucede en las capas internas del material próximas a la superficie bruñida, se realizó un análisis por microscopía electrónica de barrido en probetas planas de aluminio A96351.

En la figura 6.17-A se puede observar una fotografía hecha a 100 aumentos de la zona bruñida de la pieza en estudio. En la figura 6.017-B se observa una fotografía hecha también a 100 aumentos, pero en este caso de la zona de la pieza que está más alejada de la superficie bruñida.

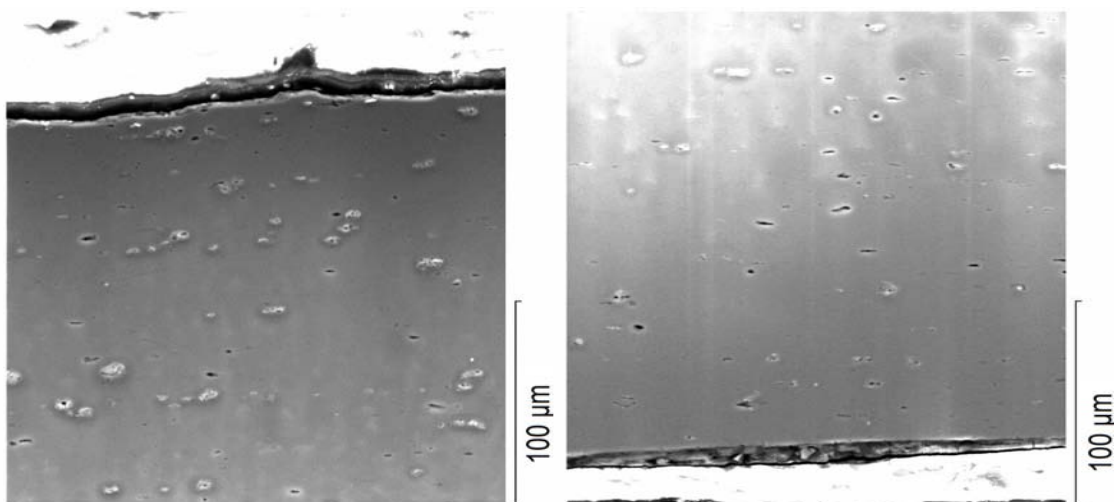


Figura 6.17. Fotografía de la zona: A- bruñida, B- sin bruñir de una probeta plana de aluminio A96351

La parte en color blanco representa la resina orgánica que se ha utilizado para la preparación de la probeta. La parte en color negro, representa una zona donde la resina, al enfriarse, se separa de la probeta. La zona en tonos de grises representa la pieza en estudio.

6.4.1. Comentarios sobre los resultados de la prueba de microscopia

En la primera fotografía se aprecia una sección transversal de los restos de las crestas y los valles del bruñido. Esto es evidente si se compara con la segunda fotografía, donde el perfil de la superficie es más recto. Las manchas blancas que se observan son restos del ataque químico que se le realiza a la probeta para poder ser observada al microscopio.

Los precipitados que se observan (pequeñas manchas blancas dentro de la pieza), son intermetálicos de Manganese y Hierro. Esto ha sido determinado por técnicas de *Energy Dispersive X-ray Spectroscopy* (EDAX) en el microscopio. En la zona no bruñida la forma de los precipitados es más alargada con una distribución plana que indica la dirección de la laminación de la barra. La zona bruñida presenta sin embargo una distribución de precipitados como si hubiera habido un desplazamiento de los mismos. Esto hace pensar que ha habido un desplazamiento del material producto del proceso de bruñido. El ancho de esta capa es de aproximadamente 20 μm . Esto podría dar una idea de la capa de material que se ve afectada por el proceso de bruñido.

6.5. Conclusiones acerca de los valores añadidos que aporta el bruñido con bola

A través de los experimentos anteriores se ha podido demostrar que el proceso de bruñido con bola no solo mejora la rugosidad superficial de las piezas que son sometidas al mismo, sino que además aporta a éstas otros dos valores añadidos:

1. Un incremento en las durezas superficiales del orden del 4% en superficies planas y de las microdurezas en el orden del 17% en superficies convexas. Esto contribuye a mejorar el coeficiente de fricción de las superficies tratadas, lo cual mejora considerablemente la resistencia al desgaste.
2. Aporta tensiones residuales de tipo compresivas, haciendo que la red cristalina sea más compacta. Esto hace que aumente la vida útil a fatiga, producto de que para que en el material se forme una grieta, es necesario aplicar una tensión externa de tracción que supere el valor de las tensiones residuales de compresión que existen en las capas superficiales del material.
3. El ancho de la capa de material afectada por el proceso está en el orden de las 20 μm .

Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros

Después de haber concluido este trabajo se ha podido ver que el proceso de bruñido con bola es efectivo, para mejorar el acabado superficial de piezas de diferentes materiales y con configuraciones geométricas tanto sencillas, como con un cierto nivel de complejidad. De esta manera los cuestionamientos iniciales planteados en este trabajo han quedado respondidos y se han cumplido los objetivos que se perseguían con el mismo.

7.1. Conclusiones

De este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

1. Es posible utilizar un proceso de deformación plástica como es el bruñido con bola, para mejorar el acabado superficial de superficies complejas. Este podría sustituir al rectificado o cualquier otro tipo de proceso de superacabado para superficies planas, cóncavas y convexas de aleaciones de aluminio y aceros.
2. Se ha desarrollado con éxito la concepción y la fabricación de una herramienta para ser utilizada en el proceso de bruñido con bola de superficies planas y curvas. Esta herramienta es de fácil instalación en cualquier tipo de máquina herramienta y su adaptación a la misma solo depende de la preparación de un sencillo sistema de conducción del fluido de corte de la propia máquina a la herramienta en cuestión.
3. Se ha obtenido un modelo físico fidedigno para predecir los valores de presión y velocidad de desplazamientos necesarios para que con la herramienta se puedan obtener unos resultados adecuados en la superficie que se elabora en cuanto a rugosidad superficial y otras prestaciones.
4. Se ha podido establecer la relación entre cómo y cuánto se deforma un cuerpo, a través del modelo físico desarrollado.
5. Este modelo es de fácil implementación y sus principales novedades radican en la consideración de los efectos de la tasa de velocidad de deformación y su efecto sobre el endurecimiento del material y el hecho de que considera que la superficie a deformar es porosa, cosas que no son consideradas por los estudios previos.
6. Se puede llegar a mejorar la rugosidad de una superficie deformándola.

7. En cuanto al trabajo experimental, para el aluminio A96351, se ensayaron piezas con superficies planas donde se obtuvieron mejorías considerables en su rugosidad superficial. La velocidad de avance de la herramienta es el parámetro más significativo sobre los valores de rugosidad, ya que ésta define la velocidad de deformación que impera en el proceso. Este material tiene un coeficiente de auto-endurecimiento alto y este coeficiente es función de la tasa de deformación que a su vez es función de la velocidad con la que se deforma el material durante el proceso.
8. Para el caso del aluminio A92017, se utilizaron probetas con superficies planas, cóncavas y convexas. En las superficies planas el parámetro que más influye sobre los valores de rugosidades obtenidos son la fuerza que ejerce la herramienta sobre el material de la pieza para deformarla y la altura de cresta previamente dejada por el fresado. Para las superficies cóncavas y convexas, el parámetro que más influye sobre la rugosidad superficial es el radio de curvatura, lográndose mejores resultados en radio más pequeños en superficies convexas y en radios mayores en superficies cóncavas. También la dirección en que se hace el bruñido respecto a la dirección en que se ha hecho el fresado previo tiene cierta importancia en superficies curvas.
9. En el acero 1038, también se evaluaron piezas con superficies planas, cóncavas y convexas. La altura de cresta previamente dejada por el fresado, es el parámetro que más influencia ejerce sobre todos los indicadores de la rugosidad superficial. La velocidad de avance no tiene ningún tipo de influencia ya que este material tiene un coeficiente de auto-endurecimiento bajo. Para las superficies convexas y cóncavas la dirección del bruñido y el radio de curvatura son los parámetros más significativos.
10. El proceso de bruñido aporta además otros valores añadidos como son el incremento que provoca en los valores de dureza superficial de la pieza en que se realiza. Esto contribuye a mejorar el coeficiente de fricción de la misma y su resistencia al desgaste.
11. También deja en la superficie unas tensiones residuales compresivas que traen como consecuencia el incremento de la vida útil a fatiga de las mismas.
12. La estructura del material de las piezas bruñidas no cambia, con lo cual bruñir una pieza no representa ningún problema desde este punto de vista.

13. El material de las crestas de las irregularidades superficiales se desplaza a cubrir los valles de la misma, con lo cual la superficie portante de la pieza también mejora.

7.2. Trabajos futuros

A partir de los resultados a los que se llegan en el presente trabajo, se puede decir que el proceso de bruñido con bola está aún poco explotado desde el punto de vista industrial con lo cual surgen toda una serie de trabajos pendientes a los cuales se les podría dar solución en un futuro inmediato como por ejemplo:

1. Realizar pruebas con otros valores para los parámetros estudiados en los mismos materiales.
2. Hacer pruebas experimentales utilizando la misma herramienta con otros materiales y crear una base de datos con recomendaciones para la utilización de este proceso en los mismos.
3. Ajustar el diseño de la herramienta desarrollada y generalizar su utilización a nivel industrial.
4. Desarrollar una herramienta para ser aplicada a procesos de torneado y adaptar el modelo físico obtenido para optimizar dicho proceso.
5. Solucionar el problema de la medición de las fuerzas a través de un dispositivo que forma parte de la propia herramienta. Para ello se tendrá que modificar el diseño actual de la herramienta.
6. Incorporar una excitación sobre la bola de la herramienta de forma que vibre a frecuencias cercanas a la ultrasónica, para mejorar con ello los efectos del bruñido sobre todo en materiales más duros.

Chapitre 7. Conclusions et travail future

Après avoir conclu ce travail, on a pu constater que le processus de rodage bille est effectif pour améliorer la finition superficielle de pièces de différents matériaux et avec de configuration géométrique aussi simple mais aussi avec un certain niveau de complexité. De cette manière le questionnement initial résumé dans ce travail à pu être effectué et on à résolu les objectifs que l'on attendait de lui même.

7.1. Conclusions

De ce travail on peut extraire les conclusions suivantes:

1. On peut utiliser un procédé de déformation plastique comme le rodage bille pour améliorer la finition superficielle des surfaces complexes. Ce processus peut être substitué ou rectifié ou n'importe quel type de processus de super finition pour surface plane, concave et convexe d'alliage d'Aluminium et d'Acier.
2. On a développé avec succès la conception et l'usinage d'un outil pour être utiliser dans le procédé de rodage bille de surface plane et complexe. Cet outil est facile d'installer dans n'importe quel type de machine outil et son adaptation à elle même dépend seulement de la préparation d'une système simple de conduction du fluide de coupe de la propre machine à l'outil en question.
3. On a obtenu un bon model physique pour prédire les valeurs de pression et de vitesse de déplacements nécessaires pour que l'outil puisse obtenir des résultats adaptés a la surface qui s'élabore quant a la rugosité superficielle et les autres prestations.
4. On a peut établir la relation entre comme et combien se déforme un corps, a travers du model mathématique développée.
5. Ce modèle est facile d'implanter et ces principales nouveautés résident en la considération des effets du taux de vitesse de déformation et son effet sur l'endurcissement du matériau et le fait que l'on considère que la surface à déformer est poreuse, chose que l'on n'a pas considéré dans les études antérieures.
6. On peut arriver à améliorer la rugosité d'une surface en la déformant.
7. Quant au travail expérimental pour l'aluminium A96351, on a essaye des échantillons avec une surface plane d'ou on a obtenu des améliorations

considérables dans sa rugosité superficielle. La vitesse d'avance de l'outil est le paramètre plus significatif que sur la valeur de rugosité, puis que celle-ci définit la vitesse de déformation qu'il y a dans le processus. Ce matériau a un coefficient d'auto-durcissement très faible, et ce coefficient est fonction du taux de déformation qui est à la fois fonction de la vitesse avec laquelle se déforme le matériau durant le processus.

8. Pour le cas de l'aluminium A92017, furent utilisés des échantillons avec des surfaces planes, concaves et convexes. Dans la surface plane le paramètre le plus important sur la valeur de rugosité obtenue sont les forces qu'exercent l'outil sur le matériel de la pièce pour la déformer et l'hauteur de crête apparemment laissée par le fraisage. Pour les surfaces concaves et convexes, le paramètre qui influe le plus sur la rugosité superficielle et le rayon de courbes, obtenant des meilleurs résultats en rayon plus petit qu'en surface convexe; et en rayon plus grands qu'en surface concave. Aussi la direction du processus de rodage bille en relation avec la direction de fraisage antérieur a une certaine importance en surface courbes.
9. Dans l'acier G10380, on a aussi évalué des échantillons avec des surfaces planes, concaves et convexes. L'hauteur de crête auparavant laissée par le fraisage est le paramètre qu'influence le plus sur tous les indicateurs de la rugosité superficielle. La vitesse d'avance n'a aucun type d'influence vu que ce matériau a un coefficient d'auto-durcissement très fort. Pour les surfaces convexes et concaves, la direction du rodage bille et le rayon de la courbe sont les paramètres plus significatifs.
10. Le processus du rodage bille apporte en plus d'autres valeurs supplémentaires comme sont l'augmentation que provoque dans les valeurs de durcissement superficiel de la pièce dans laquelle on la réalise. Ceci contribue à améliorer le coefficient de frottement d'elle-même et sa résistance à l'usure.
11. Aussi il laisse dans la surface des contraintes résiduelles comprimées qui apportent comme conséquence l'augmentation de la vie utile à la fatigue d'eux-mêmes.
12. La structure du matériau de pièce bruni ne change pas, on fait brunir une pièce ne représentant aucun problème de ce point de vue là.
13. Le matériel de crête des irrégularités superficielles se déplace en couvrant les vallées de lui-même, donc en fait la surface porteuse de la pièce s'améliore aussi.

7.2. Travaux futurs

A partir des résultats atteints dans ce travail, on peut dire que le processus du rodage bille est encore peu exploité du point du vue industriel, ce qui fait surgir toute une série de travaux non réalisés auxquelles on pourrait trouver des solutions dans un future immédiat, comme par exemple :

1. Réaliser des essais avec d'autres valeurs pour les paramètres étudiés dans les mêmes matériaux.
2. Faire des essais expérimentaux utilisant le même outil avec d'autres matériaux et créer une base de renseignements avec des recommandations pour l'utilisation de ces processus en eux-mêmes.
3. Ajuster le dessin de l'outil développé et généré son utilisation à un niveau industriel.
4. Développer un outil pour être appliquer aux processus de tournage et adapter le modèle physique obtenu pour optimiser dit processus.
5. Solutionner le problème de la mesure des forces par un dispositif faisant parti du propre outil. Pour cela on devra modifier le dessin actuel de l'outil.
6. Incorporer une excitation sur la bille de l'outil de façon à faire vibrer à des fréquences proches à l'ultrasonique pour améliorer avec ça les effets du rodage bille avant tout sur les matériaux plus durs.

Referencias bibliográficas

Artículos en revistas indexadas

- [1] A.M. HASSAN A, H.F. AL-JALIL B, A.A. EBIED. **"Burnishing force and number of ball passes for the optimum surface finish of brass components"**. Journal of Materials Processing Technology 83 (1998) 176–179.
- [2] A.M.S. Hamouda, S. Sulaiman, M.S.J. Hashmi. **"Fast upsetting of circular cylinders of aluminium metal matrix composites. Experimental results and numerical analysis"**. Journal of Materials Processing Technology 60 (1996) 723-727.
- [3] ADEL MAHMOOD HASSAN, AIMAN SHAREF A1-BSHARAT. **"Improvements in some properties of non-ferrous metals by the application of the ball-burnishing process"**. Journal of Materials Processing Technology 59 (1996) 250-256.
- [4] ADEL MAHMOOD HASSAN, AYMAN MOHAMMAD MAQABLEH. **"The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components"**. Journal of Materials Processing Technology 102 (2000) 115-121.
- [5] ADEL MAHMOOD HASSAN, SULIEMAN Z.S. AL-DHI. **"Improvement in the wear resistance of brass components by the ball burnishing process"**. Journal of Materials Processing Technology 96 (1999) 73-80.
- [6] ADEL MAHMOOD HASSAN. **"The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals"**. Journal of Materials Processing Technology 72 (1997) 385–391.
- [7] Courtin, S., Henaff-Gardin, C., Bezine, G. **"Finite element simulation of roller burnishing in crankshafts"**. Computational Mechanics Publications, Surface Treatment VI: Computer Methods and Experimental Measurements (2003) 333-342.
- [8] El-Axir, M.H. **"An investigation into roller burnishing"**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 40, Issue 11, (2000) 1603-1617.
- [9] EL-AXIR, M.H., EL-KHABEERY, M.M. **"Influence of Orthogonal Burnishing Parameters on Surface Characteristics for Various Materials"**, Journal of Materials Processing Technology, 132: 82-89, 2003.
- [10] El-Axir, M.H., El-Khabeery, M.M. **"Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials"**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 132, Issue 1-3, (2003) 82-89, The Netherlands.
- [11] El-Khabeery, M.M., El-Axir, M.H. **"Experimental techniques for studying the effects of milling roller-burnishing parameters on surface integrity"**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 41, Issue 12, (2001) 1705-1719, UK.
- [12] F.J. SHIOU, C.H. CHENG. **"Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes"**. Journal of materials processing technology (2008).
- [13] FANG-JUNG SHIOU, CHIEN-HUA CHEN. **"Freeform surface finish of plastic injection mould by using ball-burnishing process"**. Journal of Materials Processing Technology 140 (2003) 248–254.
- [14] FANG-JUNG SHIOU, CHIH-CHENG HSU. **"Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining centre"**. Journal of materials processing technology (2008).

- [15] Fattouh, M., El-Axir, M. H., Serage, S. M. **“Investigations into the burnishing of external cylindrical surface of 70/30 Cu-Zn alloy”**. Wear, Volume 127, Issue 2, (1988) 123-137, UK.
- [16] Gabb, T.P., Telesman, J., Kantzos, P., Prevey, P.S. **“Improved method being developed for surface enhancement of metallic materials”**. Advanced Materials and Processes, Volume 160, No. 1, (2002) 69-72, USA.
- [17] H. HAMADACHE, L. LAOUAR, N.E. ZEGHIB, K. CHAOUI. **“Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing”**. Journal of Materials Processing Technology 180 (2006) 130–136.
- [18] Hasegawa, S. **“The road to smoother surfaces”**. Manufacturing Engineering, Volume 126, No. 2, (2001) 70-78, USA.
- [19] Hassan, A.M. **“The effects of ball- and roller-burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals”**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 72, Issue 3, (1997) 385-391, The Netherlands.
- [20] Hassan, A.M., Maqableh, A.M. **“The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components”**. Journal of Materials Processing Technology, Volume 102, No. 1-3, (2000) 115-121, The Netherlands.
- [21] J.P.Wang. **“An investigation into friction in dynamic plane upsetting”**. Journal of Materials Processing Technology 123 (2002) P 323-328.
- [22] KLOCKE, F., LIERMANN, J. **“Roller Burnishing of Hard Turned Surfaces”**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1998, 38/56: 419-423.
- [23] M. Plancak, F. Vollertsen, J. Woitschig. **“Analysis, finite element simulation and experimental investigation of friction in tube hydroforming”**. Journal of Materials Processing Technology 170 (2005) 220–228.
- [24] M.H. EL-AXIR, A.A. IBRAHIM. **“Some surface characteristics due to center rest ball burnishing”**. Journal of Materials Processing Technology 167 (2005) 47–53.
- [25] M.H. EL-AXIR, O.M. OTHMAN, A.M. ABODIENA. **“Improvements in out-of-roundness and microhardness of inner surfaces by internal ball burnishing process”**. Journal of materials processing technology 196 (2008) 120–128.
- [26] M.H. EL-AXIR, O.M. OTHMAN, A.M. ABODIENA. **“Study on the inner surface finishing of aluminium alloy 2014 by ball burnishing process”**. Journal of materials processing technology (2007).
- [27] Martin, J. **“Roller burnishing - A cold working tool to reduce weld induced residual stress”**. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (PVP), Volume 441, (2002) 115-122, USA.
- [28] N.S.M. EL-TAYEB, K.O. LOW, P.V. BREVERN. **“Influence of roller burnishing contact width and burnishing orientation on surface quality and tribological behaviour of Aluminium 6061”**. Journal of Materials Processing Technology 186 (2007) 272–278.
- [29] NEMAT, M., LYONS, A. C. **“An Investigation of the Surface Topography of Ball Burnished Mild Steel and Aluminium”**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 16: 469-473, 2000.
- [30] Ogburn, F. **“Roll to the finish”**. Cutting Tool Engineering, Volume 53, No. 6, (2001) 54-57, USA.
- [31] Prevey, P.S., Cammett, J. **“Low cost corrosion damage mitigation and improved fatigue performance of low plasticity burnished in Al base alloy”**. Journal of Materials Engineering and Performance, Volume 10, No. 5, (2001) 548-555, USA.

- [32] R. Rajasekariah, S. Vaidyanathan **“Increasing the wear resistance of steel components by ball burnishing”**. Wear 34 (1975) 183-188.
- [33] R.L. Murthy, B. Kotiveerachari. **“Burnishing of metallic surfaces”** Prec. Eng. 3 (1981) 172-179.
- [34] S.S.G. LEE, N.H. LOH. **“Computer-integrated ball burnishing of a plastic-injection-mould cavity insert”**. Journal of Materials Processing Technology 57 (1996) 189-194.
- [35] SHIOU, F.J., CHEN, C. H. **“Determination of Optimal Ball Burnishing Parameters for Plastic Injection Moulding Steel”**, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 3: 177-185, 2003.
- [36] Westerman, W.J. **“Industry rediscovers roller burnishing”**. Machine Design, Volume 55, No. 19, (1983) 44-48, USA.
- [37] X.L. Hu, J.T. Hai, W.M. Chen. **“Experimental study and numerical simulation of the pressure distribution on the die surface during upsetting”**. Journal of Materials Processing Technology 151, pp. 367–371. 2004.
- [38] X. Peng, R. Balendra. **“Application of a physically based constitutive model to metal forming analysis”**. Journal of Materials Processing Technology 145 (2004) 180–188.
- [39] Y.C. YEN, P. SARTKULVANICH, T. ALTAN. **“Finite Element Modelling of Roller Burnishing Process”**. CIRP Annals - Manufacturing Technology Volume 54, Issue 1 (2005) 237-240.
- [40] Zhang, P., Lindemann, J. **“Effects of roller burnishing on the high cycle fatigue performance of the high strength wrought magnesium alloy AZ 80”**. Scripta Materialia, Volume 52, Issue 10, (2005) 1011-1015, The Netherlands.
- [41] Zhongjin Wang, Jun Lu*, Z.R. Wang. **“Numerical and experimental research of the cold upsetting–extruding of tube flanges”**. Journal of Materials Processing Technology 110 (2001) 28-35.
- [42] Zone-Ching Lin, Chun-kung Chen. **“Inverse calculation of the friction coefficient for upsetting a cylindrical mild steel by the experimental load”**. Journal of Materials Processing Technology 178 (2006) 297–306.

Libros

- [1] Klug , H.P.; Alexander, L.E. **“X-Ray Diffraction procedures for Polycrystalline and Amorphous materials”**. John Wiley and sons, Inc. Second edition, 1974. ISBN 0471493694.
- [2] M. BAKHSI-JOOYBARI, I. PILLINGER, P. P. HARTLEY & T. A. DEAN. **“Finite Element Simulation and Experimental Study of Hot Closed-Die Upsetting”**. Tools Man.fact. Vol. 36, No. 9, pp. 1021-1032. 1996. ISBN-0890695596515
- [3] M. MALLO GALLARDO. **“Conformación de Metales”**. Ed. Pueblo y Educación. 1987.
- [4] Odintsov, L.G. **“Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial”**, Editorial Construcción de Maquinaria, (1987) 385-422, URSS.
- [5] P. LEYVA, O. MEDEROS, M.A. ARANGUREN & M.S. CLARO. **“Ecuaciones diferenciales y sus aplicaciones”**. Ed. Pueblo y Educación. 1990.
- [6] W. F. AMES. **“Numerical Methods for partial Differential Equations”**. Thomas Nelson & Sons Limited. 1992. ISBN- 0177710861.
- [7] W. F. HOSFORD, R. M. CADDELL. **“Metal Forming, Mechanics and Metallurgy”**. Ed. Booksworld. 1993. ISBN- 0135885264.

Comunicaciones a congresos, revistas científico – técnicas y otras publicaciones

- [1] Díaz, S., Robert, T. **“Efecto del bruñido por rodillo simple en el acero AISI 1045”**. Revista Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo, Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica A.C., Volumen 2, Número 7, Año 4, (2005) México. ISSN 1665-7381.
- [2] ECOROLL AG Werkzeugtechnik. **“Application Description: Deep Rolling”**. ECOROLL AG Research Report Nr. AO-4088/1 E: 1-15, 1996.
- [3] LUCA, L. **“Investigation into the Use of Ball Burnishing of Hardened Steel Components as a Finishing Process”**. PhD Dissertation, U. of Toledo, 2002.
- [4] N. López de la Calle. **“Mejora de la Rugosidad de moldes y matrices mediante el bruñido con bola”**. VII Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. México. 2005.
- [5] Pacana, A., Korzynski, M. **“Roller burnishing parameters analyses with Taguchi method”**. Scientific Bulletins of Rzesow University of Technology, No. 193, (2002) 154-158, Poland. POULACHON, G., MOISAN, A, JAWAHIR, I.S. **“On Modelling the Influence of Thermo-Mechanical Behaviour in Chip Formation During Hard Turning of 100Cr6 Bearing Steel”**, Annals of the CIRP, 50/1: 31-36, 2001.
- [6] PREVEY, P.S., RAVINDRANATH, R.A., SHEPARD, M., GABB, T. **“Case Studies of Fatigue Life Improvement Using Low Plasticity Burnishing in Gas Turbine Engine Applications”**, Proceedings of ASME Turbo Expo, 2003, June 16-19, Atlanta, Georgia, USA.
- [7] ROETTGER, K. **“Walzen hartgedrehter Oberflaechen”**, PhD Dissertation, WZL, RWTH Aachen, 2002.
- [8] YEN, D. **“Private Communication on: Enabling Technologies for lean manufacturing of critical hardened steel applications”**, June 2003.
- [9] YEN, Y.C., ALTAN, T. **“Finite Element Modelling of Ball Burnishing - Prediction of Surface Deformation and Residual Stress”**, ERC Report No. HPM/ERC/NSM-04-R-04, Ohio State University, 2004.
- [10] Zelinski, P. **“Herramienta de bruñido para portaherramientas universales de torneado”**. Revista Metalmecánica Internacional, Volumen 5, Edición 7, (2000) 8, Colombia.

Anexos

Anexo 1. Fichas técnicas de los materiales utilizados en las probetas ensayadas

La información presentada a continuación ha sido extraída básicamente de www.matweb.com.

Anexo 1.1. Ficha técnica de material: UNS A96351

Specifications

Aluminium Association 6351

ISO 1,0Si - 0,6Mg - 0,6Mn

ASTM. Gas and oil transmission pipe: B 345. Extruded wire, rod, bar, shapes, and tube: B 221

Chemical Composition

Composition limits. 0,7 to 1,3 Si; 0,5 Fe max; 0,10 Cu max; 0,4 to 0,8 Mn; 0,4 to 0,8 Mg; 0,2 Zn max; 0,2 Ti max; 0,05 max other (each); 0,15 others (total); bal Al

Chemical Composition test

% Al	%Si	%Fe	%Mn	% Mg
≈ 97,7	0,96	0,25	0,55	0,53

Applications

Typical uses. Extruded structures used in road vehicles and railroad stock; tubing and pipe for carrying water, oil, or gasoline

Mechanical Properties

Tensile properties. Typical. T4 temper: tensile strength, 248 MPa (36 ksi); 0,2% yield strength, 152 MPa (22 ksi); elongation, 20%. T6 temper; tensile strength, 310 MPa (45 ksi); 0,2% yield strength, 283 MPa (41 ksi); elongation, 14%.

Property limits for extrusions. T54 temper; tensile strength (min), 207 MPa (30 ksi); 0,2% yield strength (min), 138 Mpa (20 ksi); elongation (min), 10%

Shear strength. T6 temper, 200 MPa (29 ksi)

Hardness. T6 temper, 95 HB with 500 kg load, 10 mm diam ball

Fatigue strength. Typical, T6 temper: 90 MPa (13 ksi) at 5×10^8 cycles in R.R. Moore type test

Mass Characteristics

Density. 2,71 g/cm³ (0,098 lb/in³)

Thermal Properties

Liquidus temperature. 650 °C (1202 °F)

Solidus temperature. 555 °C (1030 °F)

Coefficient of thermal expansion. Linear 23,4 µm/m·K (13,0 µin/in·°F) at 20 to 80 °C (68 to 176 °F)

Thermal conductivity. 176 W/m·K (102 Btu/ft·h·°F) at 25 °C (77 °F)

Fabrication Characteristics

Annealing temperature. 350 °C (660 °F); hold at temperature for about 4 h

Solution temperature. 505 °C (940 °F)

Aging temperature. 170 °C (338 °F); hold at temperature 6 h

Anexo 1.2. Ficha técnica de material UNS A92017

Specifications

Aluminum Association 2017

ISO designation Al Cu4MgSi

4,0Cu – 0,6Mg – 0,7Mn – 0,5Si

AU4G - LA 2017

ASTM B 211 and B 316

SAE J454

ANSI H38.4 and H38.12

Chemical Composition

Composition limits. 0,2 to 0,8 Si; 0,7 max Fe; 3,5 to 4,5 Cu; 0,4 to 0,8 Mg; 0,4 to 1,0 Mn; 0,1 max Cr; 0,15 max Ti; 0,25 max Zn; 0,05 other (each); 0,15 others (total); bal Al

Applications

Typical uses. Alloy 2017, which was the first alloy developed in the Al-Cu-Mg series, is now in rather limited use, chiefly for rivets. Used in components for general engineering purposes, structural applications in construction and transportation, screw machine products, and fittings.

General characteristics. Age-hardenable wrought aluminum alloy with medium strength and ductility, good machinability, good formability, and fair resistance to atmospheric corrosion. Welding is not recommended unless heat treatment after welding is practicable. Its service temperature is below 100 °C (212 °F).

Forms available. Forgings, extrusions, bars, rods, wire, shapes, and rivets

Properties

Physical Properties	
Density	2,80 g/cm ³
Mechanical Properties (T4)	
Hardness, Brinell	105
Tensile Strength, Ultimate	427 MPa
Tensile Strength, Yield	275 MPa
Elongation at Break	22 %
Modulus of Elasticity	72,4 GPa
Modulus of rigidity	27,5 GPa
Shear Modulus	262 GPa

Fabrication Characteristics

Annealing temperature. 415 °C (775 °F) for a heat-treated anneal and 340 to 350 °C (640 to 660 °F) for cold-work anneal

Solution temperature. 500 to 510 °C (930 to 950 °F)

Aging temperature. Room temperature

Machinability. Fair to good in the annealed condition and excellent in the solution treated and naturally aged condition (T4 temper)

Workability. Has good formability. In the annealed condition (O temper) its formability is equal to or superior to 2024-O. In the T4 temper condition, it forms as readily as 2024-T3 or 2024-T4.

Weldability. Because of the effect of heating on corrosion resistance, welding is rarely recommended except where heat treatment after welding is practicable. The inert gas method and resistance welding have given satisfactory results. Gas welding, brazing, and soldering are not successful. This alloy is so sensitive to cracking during welding

that other aluminum alloys, joint design, fixtures, and so on must be arranged so as to put a minimum stress on the joint during cooling. The best filler material is parent metal.

Corrosion Resistance

A92017 has a fair resistance to atmospheric corrosion, depending on its thermal treatment. Quenching slowly from the solution-treatment temperature lowers the resistance to corrosion and makes this alloy susceptible to intergranular attack.

The same result is obtained by heating the alloy after solution treatment. If, however, the alloy has been slowly quenched, artificial aging tends to restore the normal resistance to attack; in fact, for material that is to be artificially aged, a mild quench may be preferable. For thicker sections, the rate of cooling even by immersion in cold water is not great enough to produce complete freedom from susceptibility to intergranular attack. In thin sections the solution treated material, being aged at room temperature, is more resistant to corrosion than the fully aged material, while in heavy sections the latter is more resistant because of the beneficial effect of artificial aging on more slowly cooled material.

Anexo 1.3. Ficha técnica de material UNS G10380

Specifications

AISI 1038 Steel

ASTM A29, A510, A544, A545, A546, A576

SAE J403, J412, J414

DIN 1.1176

AFNOR XC 38 TS (France)

Categories

Metal; Ferrous Metal; Carbon Steel; AISI 1000 Series Steel; Medium Carbon Steel

Material Notes

Typical uses include machine, plow, and carriage bolts, tie wire, cylinder head studs, and machined parts, U-bolts, concrete reinforcing rods, forgings, and non-critical springs.

Properties

Physical Properties	
Density	7,845 g/cm ³
Mechanical Properties	
Hardness, Brinell	149
Hardness, Rockwell B	80
Hardness, Vickers	155
Tensile Strength, Ultimate	515 MPa
Tensile Strength, Yield	285 MPa
Modulus of Elasticity	200 GPa
Chemical Composition	
Carbon, C	0,34 – 0,42 %
Iron, Fe	98,59 – 99,09 %
Manganese, Mn	0,6 – 0,9 %
Phosphorous, P	<= 0,04 %
Sulfur, S	<= 0,05 %

Anexo 2. Ensayos para determinar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en la fabricación de las probetas de los experimentos.

Cuando una pieza metálica es deformada plásticamente en frío, ésta se va auto-endureciendo a medida que ocurre dicho proceso. Durante el proceso que resulta de la deformación del cuerpo, la tensión y el endurecimiento usualmente crecen y los términos trabajo de endurecimiento y trabajo de deformación se refieren a cuanto es el tensionado debido a la deformación en frío.

El método más común para observar el endurecimiento de un material metálico durante su deformación de una manera cuantitativa, es a través del ensayo de tracción del mismo. Otros métodos a través de los cuales también se puede observar este fenómeno son los ensayo de compresión directa, de torsión, de equilibrado bidireccional y el de compresión en tensión plana.

El ensayo de tracción es el más sencillo, por ello será el utilizado para determinar la influencia del endurecimiento durante la deformación, en el proceso en estudio.

Anexo 2.1. Ensayo de tracción uniaxial

A continuación se describirá el ensayo realizado para el aluminio A92017. Para los otros dos materiales en estudio (el aluminio A96351 y el acero G1308), el proceso es similar, con lo cual solo se mostrarán los resultados del experimento.

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción están influenciados por las condiciones en las que se desarrollan el mismo en cada caso. Estas condiciones son:

- La velocidad de deformación. En este caso fue utilizada una velocidad de 10 mm/s.
- Las temperaturas a la que se realiza. La temperatura ambiente era de 27°C.
- Las mediciones se limitan a medir una sección en la que se experimenta un estado de tensión de tracción unidimensional en un proceso de deformación uniforme.

La información básica obtenida en este ensayo es la carga o la fuerza F , necesaria para provocar una determinada elongación Δh . A partir de estos datos, los valores de

tensión y de deformación se calculan ya que proporcionan una información más general.

La figura A2-1 muestra el esquema de la curva típica de esfuerzo – deformación, obtenida experimentalmente para el aluminio A92017 (figura A2-2). Dado que el comportamiento elástico que se produce es muy pequeño en comparación con el total del ensayo, esta zona aparece como una línea casi vertical cercana al eje de las ordenadas, ya que todos los datos se trazan en una escala común.

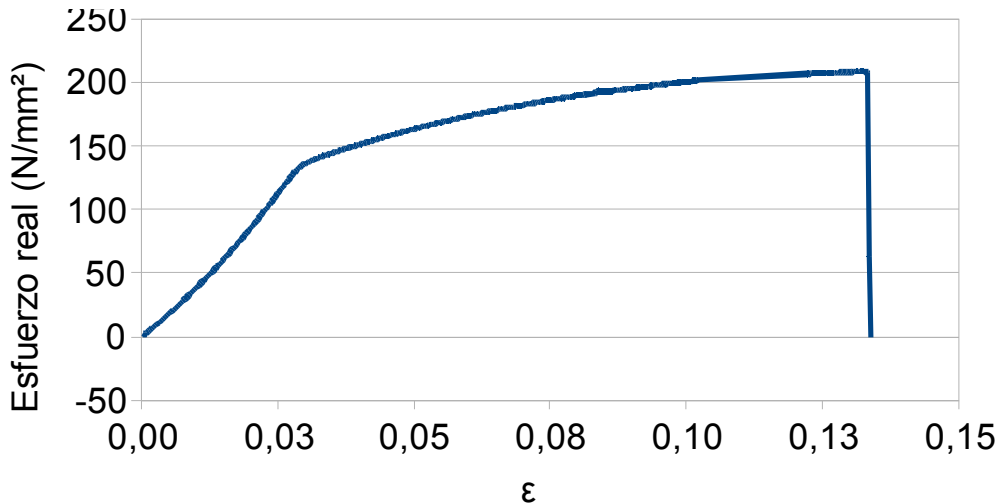


Figura A2- 1. Curva experimental de esfuerzo – deformación para el material de la pieza de trabajo, en el ensayo de tracción



Figura A2- 2. Probeta utilizada en los ensayos de tracción del aluminio A92017

Anexo 2.2. Propiedades mecánicas

Del ensayo anterior se pueden extraer varias propiedades mecánicas interesantes para el estudio del material de la pieza de trabajo. Por ejemplo:

$$\sigma_f = \frac{F_y}{A_0} \quad (A2-1)$$

Donde:

F_y - Fuerza de tracción ejercida sobre la pieza de trabajo.

A_0 - Área inicial de la sección transversal de la pieza de trabajo.

σ_f - Límite elástico: Que se define como el valor de tensión a partir del cual el material comienza a fluir.

En todo caso σ se puede definir en todo instante de tiempo como el valor del esfuerzo que provoca una cierta deformación en el cuerpo en estudio.

$$E = \frac{\Delta F}{A} \frac{h_i}{\Delta h} \quad (\text{A2-2})$$

Donde:

E - Módulo de *Young*

ΔF - Diferencia de fuerzas entre dos puntos consecutivos

Δh - Diferencia de Elongación producto del incremento de la fuerza

La curva experimental de la figura A2-3, difiere de la teórica para el mismo material, en que en ella está reflejado el efecto del endurecimiento que va teniendo el material producto del proceso de deformación a que está siendo sometido. Este efecto se considera en la siguiente expresión:

$$\sigma = K_1 \varepsilon^n \quad (\text{Ecuación de Hollomon}) \quad (\text{A2-3})$$

Donde:

ε - Deformación real inducida por la fuerza F

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{A_0 - A}{A_0}} \right) \quad (\text{A2-4})$$

Donde:

A_0 - Área de la sección transversal del cuerpo en estudio antes de ser deformado

A - Área de la sección transversal del cuerpo en estudio durante la deformación

σ - Nuevo valor para el esfuerzo, producto del endurecimiento del material

K_1 - Valor de esfuerzo para tasa de deformación unitaria

n - Coeficiente de endurecimiento por deformación. Es un factor indicador de la ductilidad y/o conformabilidad de los metales y aleaciones. Experimentalmente, el valor de n se determina graficando los valores de los logaritmos naturales del esfuerzo y de la deformación obtenidos en un ensayo de tracción (figura A2-3) y calculando por el método de ajuste por mínimos cuadrados, la pendiente de la recta resultante. $n=1$ para la zona de deformación elástica del material, $n \neq 1$ para la zona de deformación plástica del material.

De esta manera y determinando experimentalmente los valores de K y n , se podría obtener los valores de esfuerzos reales en cada momento, así como el límite elástico del material, durante el desarrollo del proceso de deformación plástica de una pieza de Aluminio.

En el gráfico de la figura A2-3, se muestran los resultados obtenidos para la pieza de aluminio A92017.

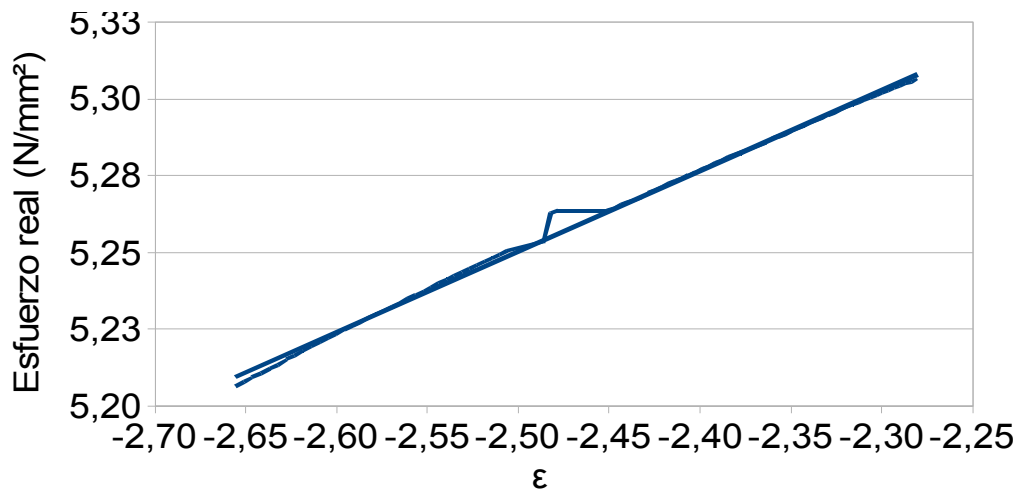


Figura A2- 3. Gráfico de tensión real – deformación real, en escala logarítmica para determinar K y n

De la misma manera si se quiere encontrar el esfuerzo de fluencia a tracción pura γ , se puede obtener a través de la siguiente fórmula:

$$\gamma = K_1 H^n \quad (A2-5)$$

si $\sigma_r = \sigma_\theta$

Donde:

H - Intensidad de la tasa de deformación a corte.

Se sigue el mismo procedimiento para los otros dos materiales en estudio. En la tabla A2-1 se resumen los valores de las propiedades encontrados para los 3 materiales.

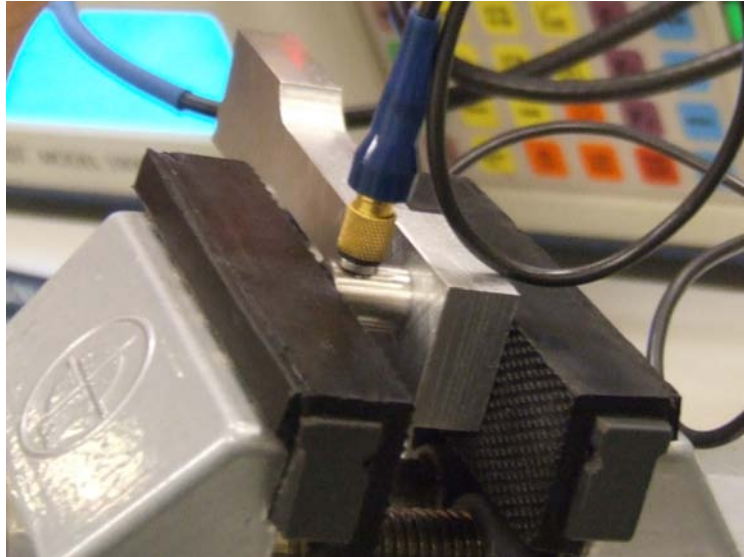
Denominación del material	Densidad ρ (gr/mm ³)	Módulo de Young E (GPa)	K (N/mm ²)	n (adimensional)	γ (N/mm ²)
Aluminio A96351	0.00270	74,000	436.5	0,274	93.5
Aluminio A92017	0,00279	78,000	367.7	0.260	140
Acero G10380	0,00784	211,344	1117	0.190	416

Tabla A2- 1. Constantes del modelo y propiedades que caracterizan a los materiales, determinadas a través del ensayo de tracción

Anexo 2.3. Determinación del módulo de Young por ultrasonidos

Para contrastar los resultados obtenidos a través del ensayo de tracción, se determinó el módulo de *Young* de los materiales ensayados a través de la técnica de ultrasonidos.

Un material puede, a la vez, transmitir y reflejar ondas elásticas. Un transductor ultrasónico aprovecha el efecto piezoeléctrico para introducir una serie de pulsos elásticos a alta frecuencia en el material, por lo general por encima de los 100000 Hz. Los pulsos crean una onda de deformación por compresión, que se propaga a través del material. La onda elástica se transmite a través del material a una velocidad que depende del módulo de elasticidad y de la densidad del mismo. En este caso se utiliza el método del pulso y el eco, o de reflexión (figura A2-4). Se genera un pulso ultrasónico que es transmitido a través del material en estudio. Cuando la onda elástica choca con una interfase, parte de la onda se refleja, regresando al transductor. En un osciloscopio (figura A2-5) es posible mostrar tanto el pulso inicial como el reflejado. Del despliegue, se mide el tiempo requerido para el viaje de ida y vuelta, con lo que se puede conocer la distancia a la que se encuentra la interfase. De no existir fallas en el material, el haz se reflejará desde su lado opuesto y la distancia será dos veces el espesor de la pared, mientras que moviendo el transductor sobre la superficie, se puede conocer, también la longitud de la discontinuidad. Esto se hace con el material de las probetas ensayadas en dos direcciones y el contraste de los resultados obtenidos sirve para determinar el módulo de *Young* del material.



FiguraA2- 4. Colocación del transductor sobre la superficie de la pieza a ensayar

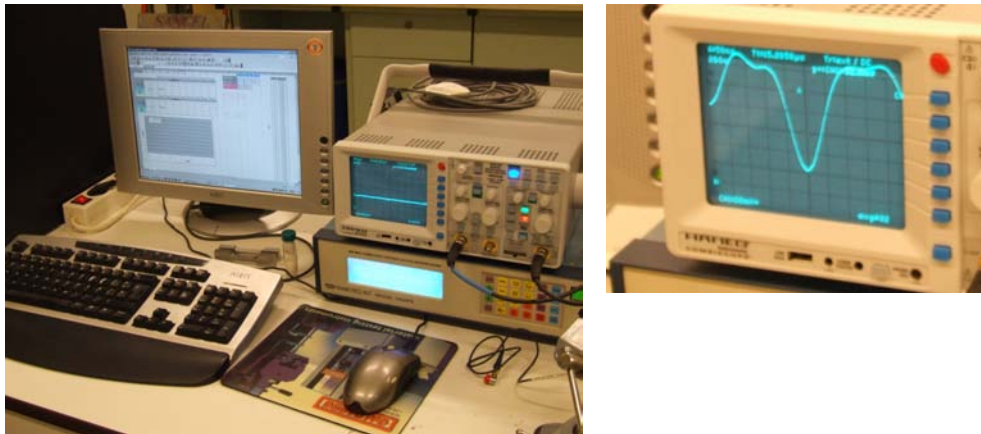
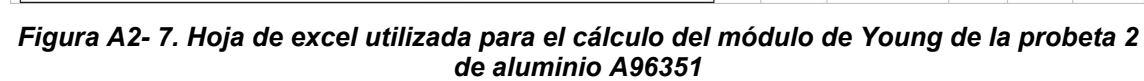
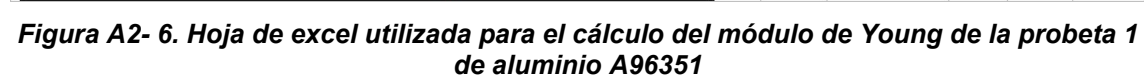


Figura A2- 5. Instalación utilizada para hacer las mediciones de ultasonidos

Las mediciones se efectuaron en dos probetas de cada material ensayado para poder tener unos resultados más fiables. Estos se encuentran a continuación en las figuras A2-6 a la A2-11.



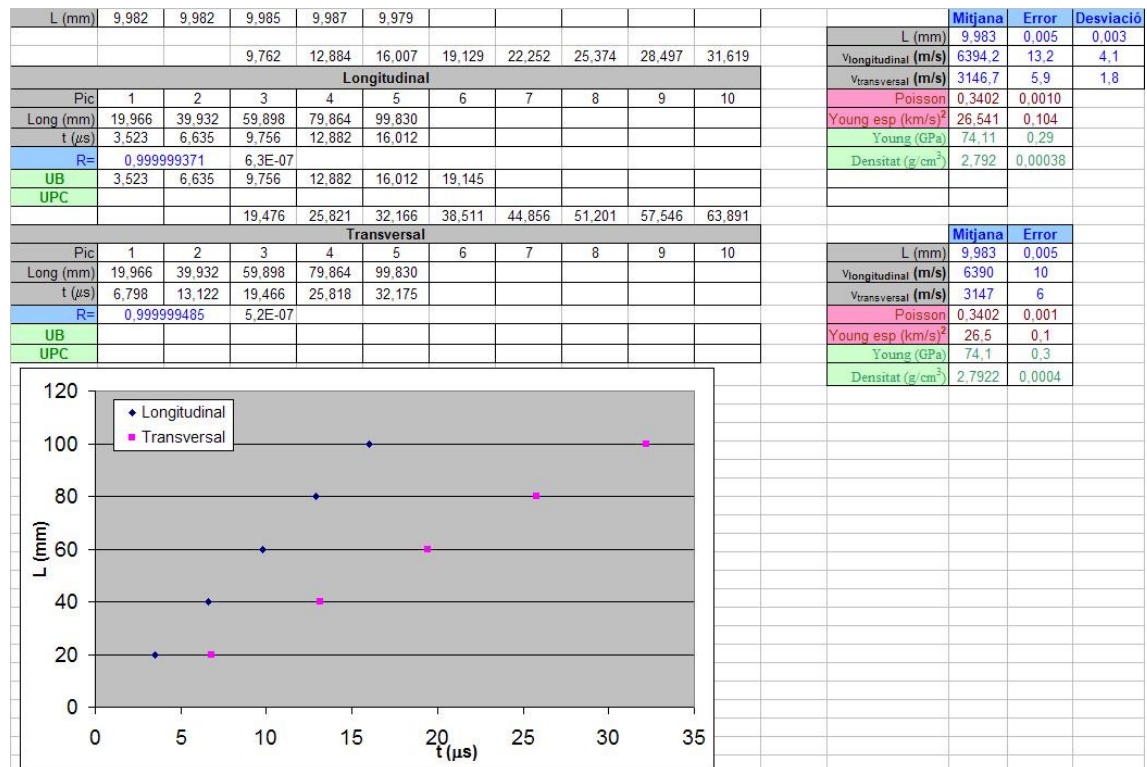


Figura A2- 8. Hoja de excel utilizada para el cálculo del módulo de Young de la probeta 1 de aluminio A92017

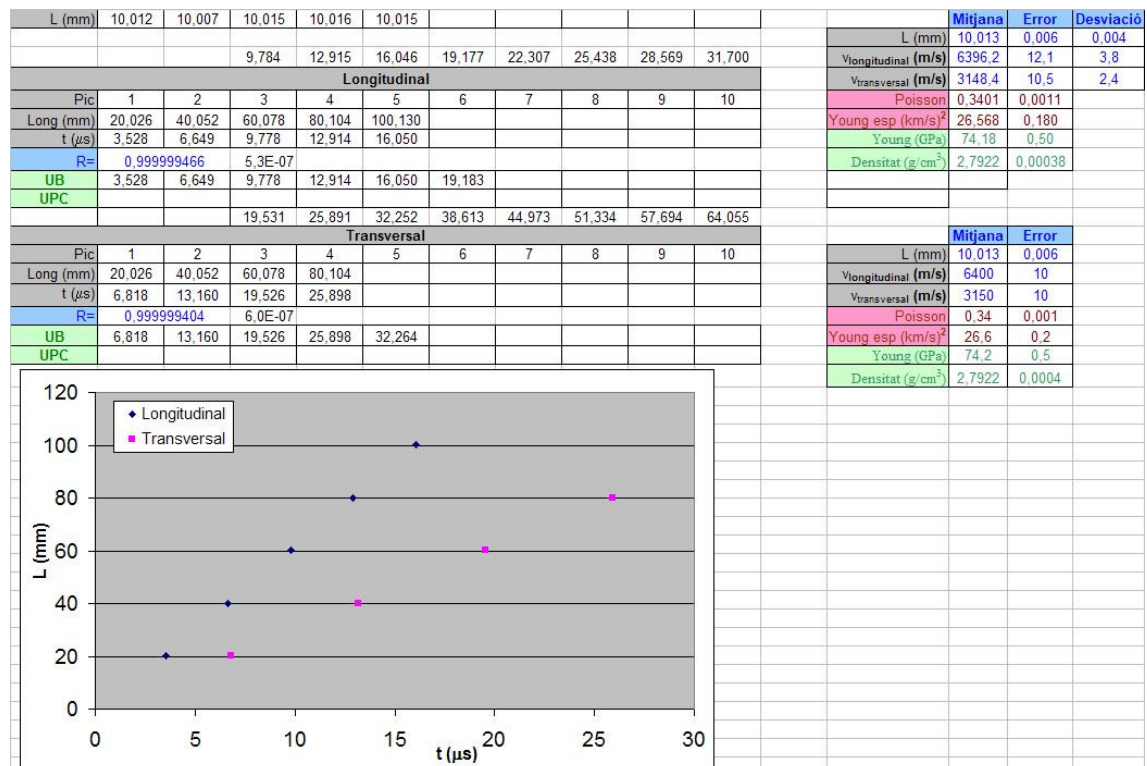


Figura A2- 9. Hoja de excel utilizada para el cálculo del módulo de Young de la probeta 2 de aluminio A92017

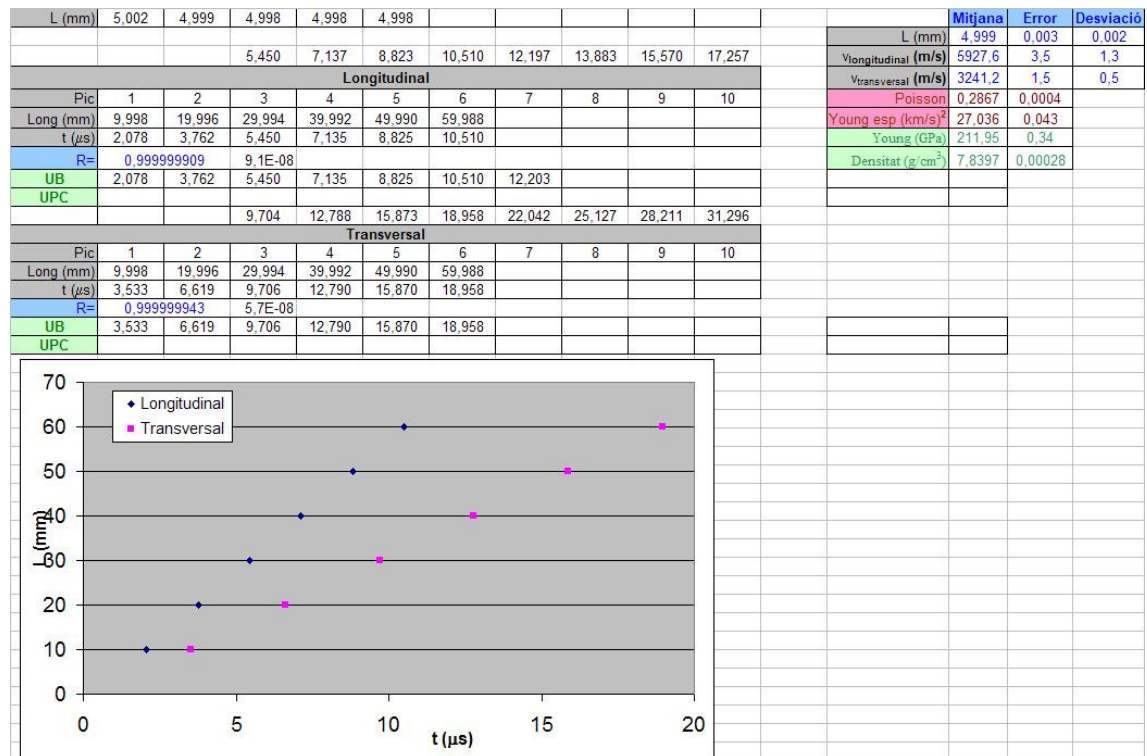


Figura A2- 10. Hoja de excel utilizada para el cálculo del módulo de Young de la probeta 1 de acero G10380



Figura A2- 11. Hoja de excel utilizada para el cálculo del módulo de Young de la probeta 2 de acero G10380

Por último se muestran los resultados obtenidos para el módulo de *Young* en el caso de ambos materiales. Estos resultados son muy similares a los obtenidos para cada material a través del ensayo de tracción descrito anteriormente, como se puede observar en esta tabla comparativa (tabla A2-2).

Material	Ensayo de tracción (GPa)	Ultrasonidos (GPa)
A 96351	74,000	74,126
A 92017	78,000	76,145
G 10380	211,344	211,795

Tabla A2- 2. Comparación de los valores del módulo de Young E , obtenidos por el ensayo de tracción y por ultrasonidos

Anexo 3. Cálculos desarrollados para el análisis del diseño de la herramienta

Anexo 3.1. Componentes fundamentales de la herramienta

En la figura A3-1 se puede observar un croquis detallado de los elementos fundamentales que forman la herramienta.

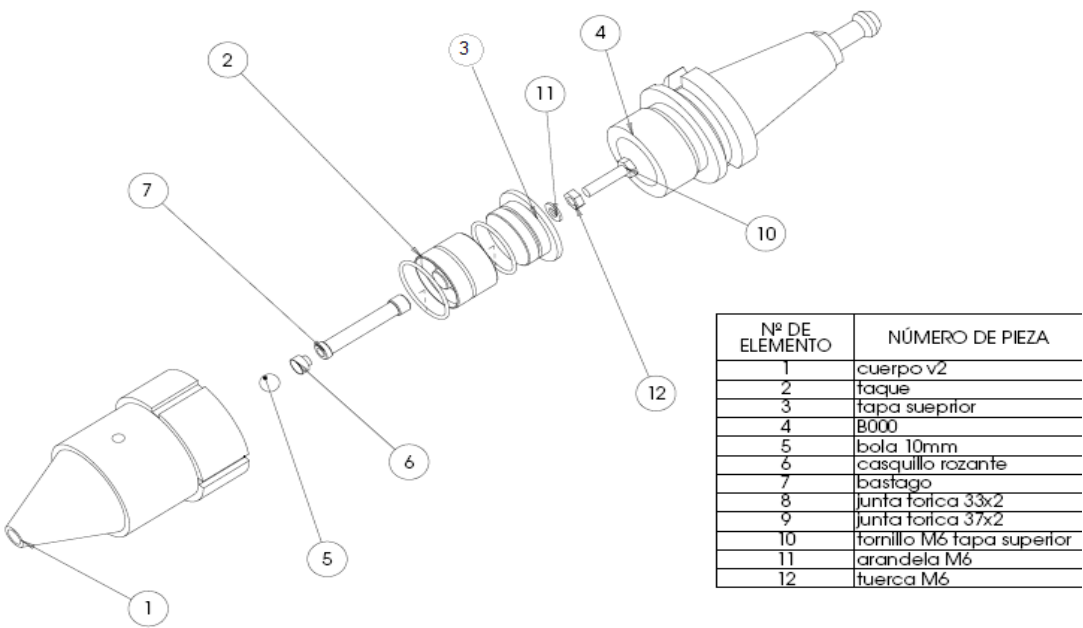


Figura A3- 1. Esquema de los componentes fundamentales que componen la herramienta desarrollada

Anexo 3.2. Cálculos de fuerzas y presiones hidráulicas.

El sistema que forma la herramienta (figura A3-2) se encuentra en equilibrio, la presión en la cámara 1 ($P1$) genera una fuerza normal sobre el área 1 ($A1$) del vástago. Como el vástago se deforma por compresión pero de manera casi imperceptible, realiza una transmisión directa de la fuerza contra el fluido de la cámara 2, ejerciéndose una fuerza ($F2$) de igual magnitud y sentido opuesto generando una presión $P2$. Esto es debido a la diferencia de áreas involucradas. Dado que la superficie 2 es menor que la superficie 1, la presión $P2$ será más elevada que $P1$. En el caso de la herramienta diseñada, en la cámara de $P2$ no hay un fluido sino un sólido rígido, pero como no se va a deformar, va a tener el mismo comportamiento.

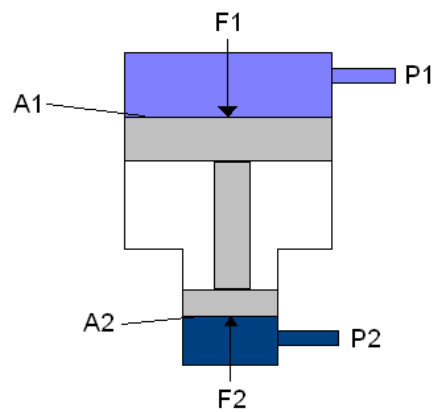


Figura A3-2. Esquema de fuerzas y presiones sobre la herramienta

En la figura A3-3 se pueden distinguir dos zonas de cálculo de fuerzas y presiones. La primera es la formada por la parte superior del vástago con el émbolo de desplazamiento del taqué, la segunda es la que forman la parte inferior del vástago, donde se encuentran el casquillo de fricción de la bola y la superficie de trabajo. La relación entre las áreas en cuestión será lo que producirá el aumento de presiones.

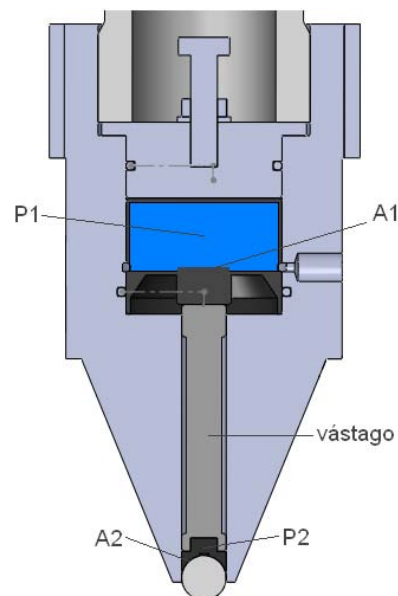


Figura A3-3. Esquema de puntos de cálculo

Analizando el sistema anterior se puede llegar a calcular la presión P_2 , que es necesaria ejercer para poder deformar las irregularidades superficiales de una pieza de trabajo a través de la utilización de la herramienta, sabiendo las características del material de la misma.

Así por ejemplo para el aluminio A96351, teniendo en cuenta sus propiedades mecánicas, se tiene que el área de contacto entre la bola de la herramienta y la pieza de trabajo es de aproximadamente 0,047 mm² y la presión P_2 que es necesaria ejercer para deformar sus irregularidades superficiales es de 0,29 bar.

A primera vista se puede ver que debido a la relación de las áreas involucradas el aumento de presión es muy elevado. De esta manera se puede justificar que las bajas presiones con la que suele trabajar la bomba del circuito de fluido de corte de la máquina, son suficientes para deformar las irregularidades superficiales de las piezas que se bruñen.

Anexo 3.3. Análisis de los esfuerzos en el cuerpo de la herramienta

Para realizar el cálculo de esfuerzos del cuerpo se ha utilizado el paquete de elementos finitos COSMOS del programa SolidWorks. Es evidente que el cuerpo de la herramienta está sometido a muy pocos esfuerzos. El esfuerzo que más se podría destacar debido al proceso de trabajo, es la flexión en el cuerpo de la herramienta, generada por la fuerza de fricción de la bola contra el material de trabajo.

La fuerza de fricción generada entre la bola y el material de trabajo produce un esfuerzo de flexión sobre toda la parte no sujeta al cono de la herramienta. Esta fuerza de fricción, para las condiciones de trabajo de la herramienta, tiene un valor muy pequeño de manera que la fuerza que produce el esfuerzo de flexión también lo es, y consecuentemente la flexión en el cuerpo es muy pequeña. Para demostrar esta afirmación se realizan los cálculos que se describen a continuación.

La presión que ejerce la bola sobre la pieza es de:

$$P_b = 48,84 \text{ N/mm}^2$$

Este valor de presión se obtiene al analizar la influencia de la presión hidráulica del fluido de corte de la máquina sobre la superficie de trabajo.

La superficie de la huella de contacto de la bola contra la pieza es:

$$A_b = 0,094 \text{ mm}^2$$

Según esto, la fuerza mínima que tendrá que ejercer la herramienta sobre el material de la pieza de trabajo será aproximadamente:

$$F = 4,6 \text{ N}$$

Y la fuerza de fricción F_r tangencial a la bola y perpendicular al cuerpo de la herramienta para la condición más crítica de rozamiento con un $\mu=0,75$ es de:

$$F_r = 3,4 \text{ N}$$

El factor de seguridad obtenido según el programa en el cuerpo es de 858.236 para el punto más crítico, de manera que el cuerpo queda muy sobredimensionado. Esto se justifica debido a que el diseño con esas magnitudes ha venido dado por las limitaciones geométricas de los elementos de unión a la máquina y los componentes normalizados internos.

En las figuras A3-4y A3-5 se puede ver la representación de COSMOS para el cálculo de presiones y desplazamientos producidos, considerando una fuerza perpendicular a la punta de 3,4 N.

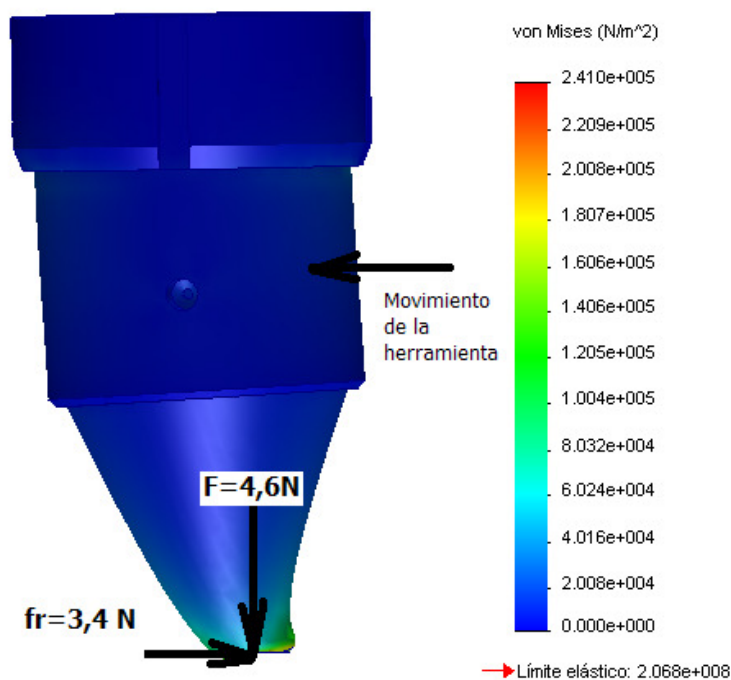


Figura A3-4 . Representación de las fuerzas que actúan sobre el cuerpo y el estado tensional resultante

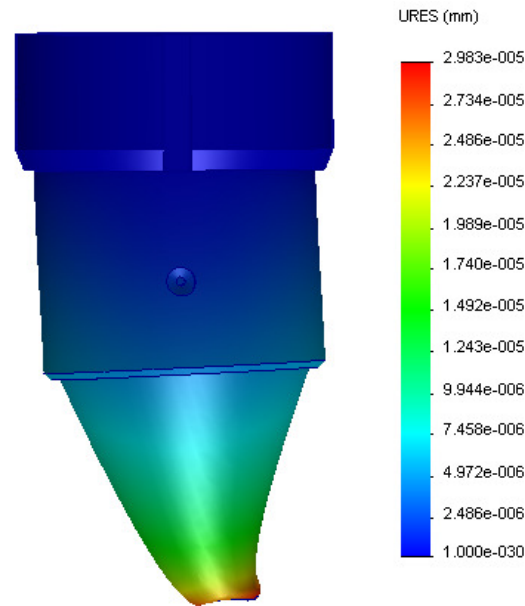


Figura A3-5. Representación de los desplazamientos de cada punto del cuerpo resultantes del estado tensional

Si se analizan las representaciones colorimétricas, juntamente con sus escalas pertinentes se puede ver claramente que sucede lo esperado. Las mayores sollicitaciones se encuentran en la punta de la herramienta, obteniendo una presión máxima de $0,24 \text{ N/mm}^2$ y un desplazamiento máximo de $2,98 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$. La representación realizada por el programa exagera todas las magnitudes a nivel de desplazamientos visuales para que sea perceptible la deformación.

En el resto de elementos de la herramienta se ha realizado el mismo análisis y los resultados son similares, con lo cual se puede concluir que la herramienta tal como ha quedado diseñada, no presenta ningún problema de resistencia.

Anexo 4. Descripción de los indicadores de rugosidad superficial utilizados en el estudio

Para caracterizar la calidad superficial de una superficie en 2 dimensiones se pueden calcular los parámetros en el perfil bruto (P) o tras filtración, en el perfil de rugosidad (R) ó el perfil de ondulación (W). Para cada parámetro, se definen el tipo de filtro y el *cut-off* a utilizar. Por consiguiente, es posible solicitar varias ocurrencias de un mismo parámetro, con ajustes diferentes.

Anexo 4.1. Condiciones de cálculo

La norma ISO 4287:1997 define ciertos parámetros en una longitud básica y otros en la longitud de evaluación. Tras la estimación de los parámetros en una longitud básica; se efectúa la media de estos parámetros en el conjunto de las longitudes básicas, tal y como se indica en la norma ISO 4288:1998.

Anexo 4.1.1. Parámetros de la norma ISO 4287:1997

Para los perfiles: P por perfil bruto (figura A4-1), R por perfil de rugosidad (figura A4-2) y W por perfil de ondulación. La lista siguiente presenta los parámetros con el prefijo X que hay que sustituir por P , R ó W según las necesidades.

Los parámetros relacionados con la longitud básica utilizan l_b y los relacionados con la longitud de evaluación utilizan l_e .

Así para la rugosidad superficial media aritmética de las diferencias con la media (R_a), se calcula utilizando (A4-1)

$$R_a = \frac{1}{l_b} \sum_0^{l_b} |Z_{(x)}| \quad (\text{A4-1})$$

El resultado se indica en la unidad de longitud del eje Z , en este caso en μm .

La rugosidad total del perfil en la longitud de evaluación (R_t) representa la altura entre el pico más alto y el valle más profundo, independientemente de las longitudes básicas. El resultado también se indica en la unidad de longitud del eje Z , en este caso en μm .

Anexos

El indicador R_t tiene como desventaja falsearse fácilmente a causa de puntos extremos aberrantes.

En la figura A4-1 se puede observar un perfil de rugosidad superficial medido y el valor de R_a y R_t del mismo.

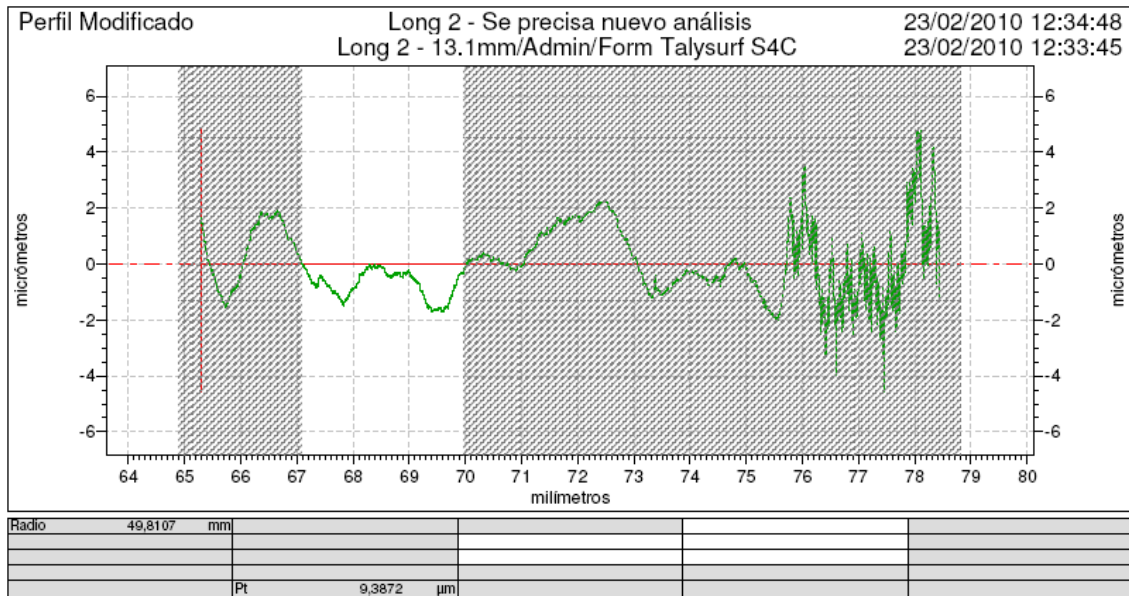


Figura A4- 12. Gráfico del perfil bruto de la superficie de una pieza bruñida.

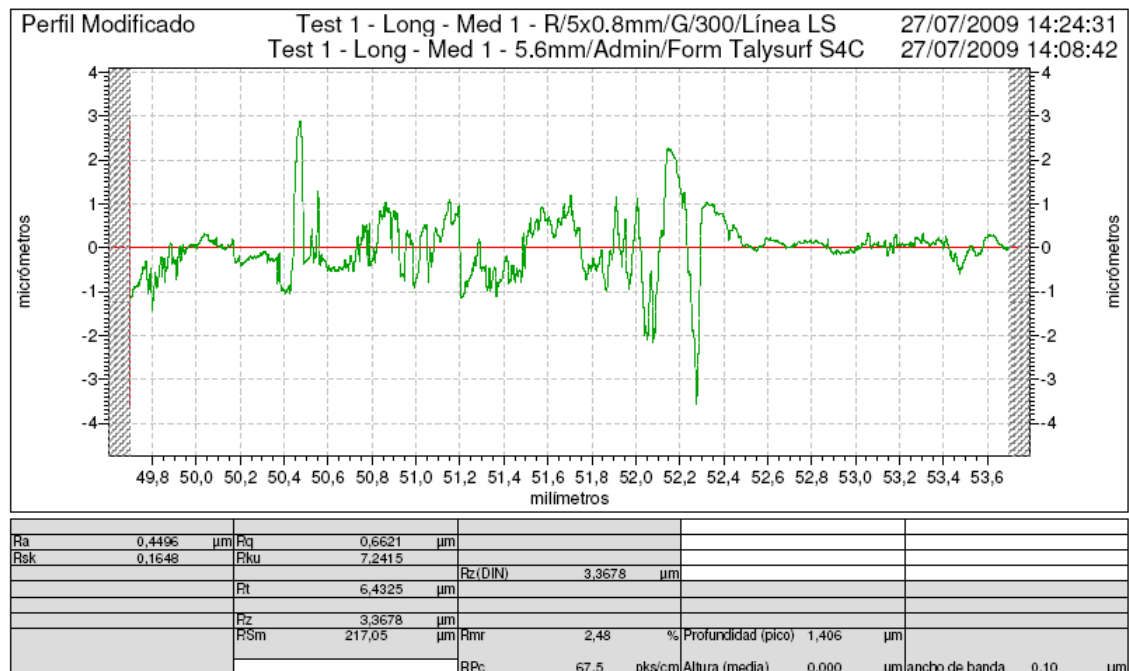


Figura A4- 13. Gráfico del perfil de rugosidad superficial de una pieza bruñida.

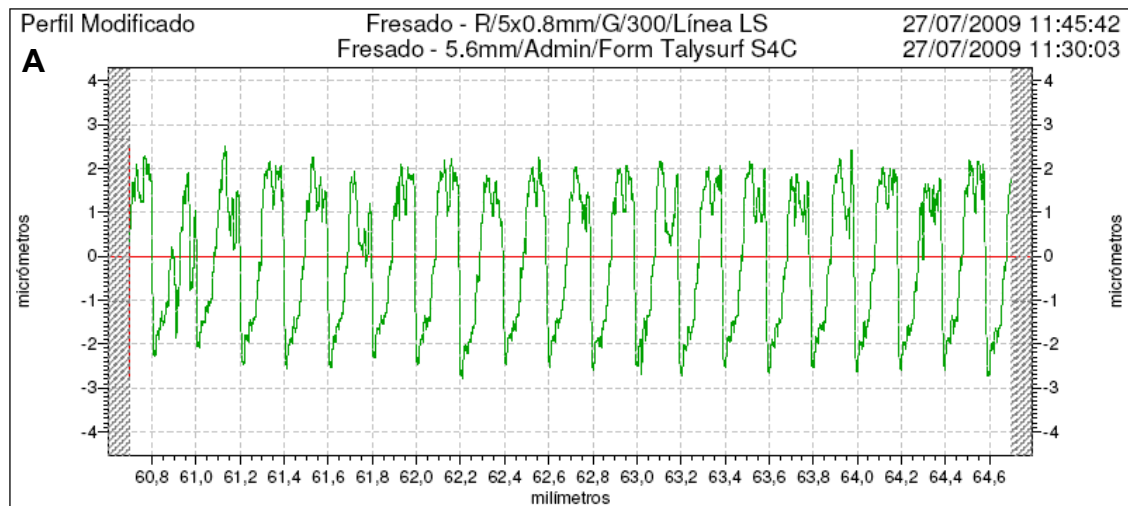
Anexo 4.2. Referencias normativas

1. ISO 3274:1997: Estados de superficie: método del perfil, características nominales de los aparatos de contacto.
2. ISO 4287:1997: Estados de superficie: método del perfil, términos, definiciones y parámetros de estados de superficie.
3. ISO 4288:1996: Estados de superficie: método del perfil, reglas y procedimientos para la evaluación del estado de superficie.
4. ISO 11562:1997: Caracterización metrológica de los filtros con fase correcta y bandas de transmisión a utilizar en los perfilómetros de contacto.

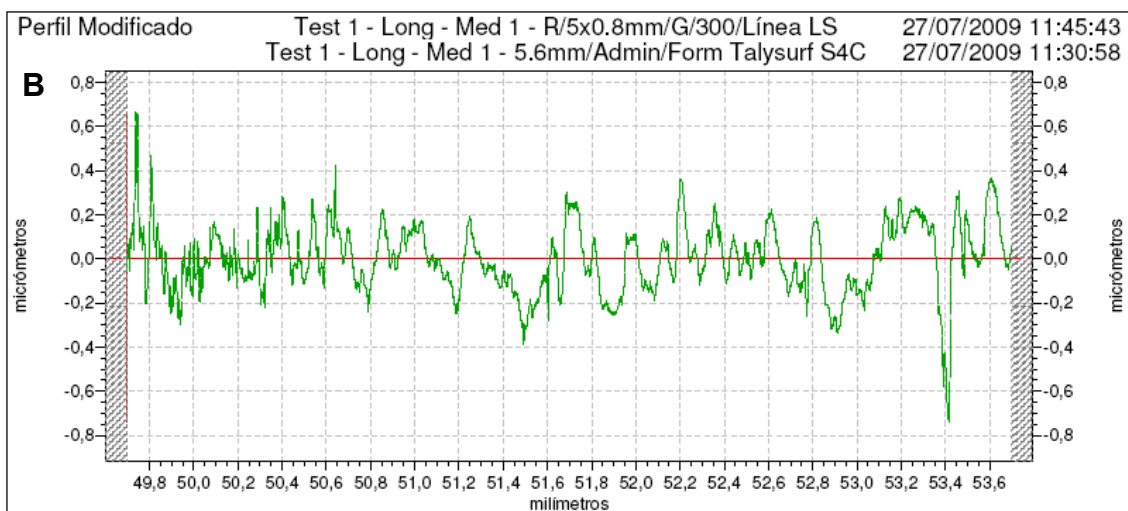
Anexo 5. Gráficos obtenidos para los parámetros medidos durante el proceso de bruñido

A continuación se muestran algunos de los gráficos obtenidos para la medición de los indicadores de rugosidad superficial para cada uno de los experimentos.

Anexo 5.1. Experimento 1- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas planas de Aluminio A96351



Ra	1,4002	μm	Rq	1,5344	μm				
Rsk	-0,1647		Rku	1,4973		Rz(DIN)	5,0232	μm	
			Rt	5,2900	μm				
			Rz	5,0232	μm				
			RSm	189,51	μm	Rmr	36,17	% Profundidad (pico)	1,406
						RPc	60,0	pkts/cm	Altura (media)
								0,000	μm ancho de banda
									0,10



Ra	0,1205	μm	Rq	0,1548	μm				
Rsk	-0,1587		Rku	4,4749		Rz(DIN)	0,8230	μm	
			Rt	1,4039	μm				
			Rz	0,8230	μm				
			RSm	145,20	μm	Rmr	100,00	% Profundidad (pico)	1,406
						RPc	82,5	pkts/cm	Altura (media)
								0,000	μm ancho de banda
									0,10

Gráfico A5- 1. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

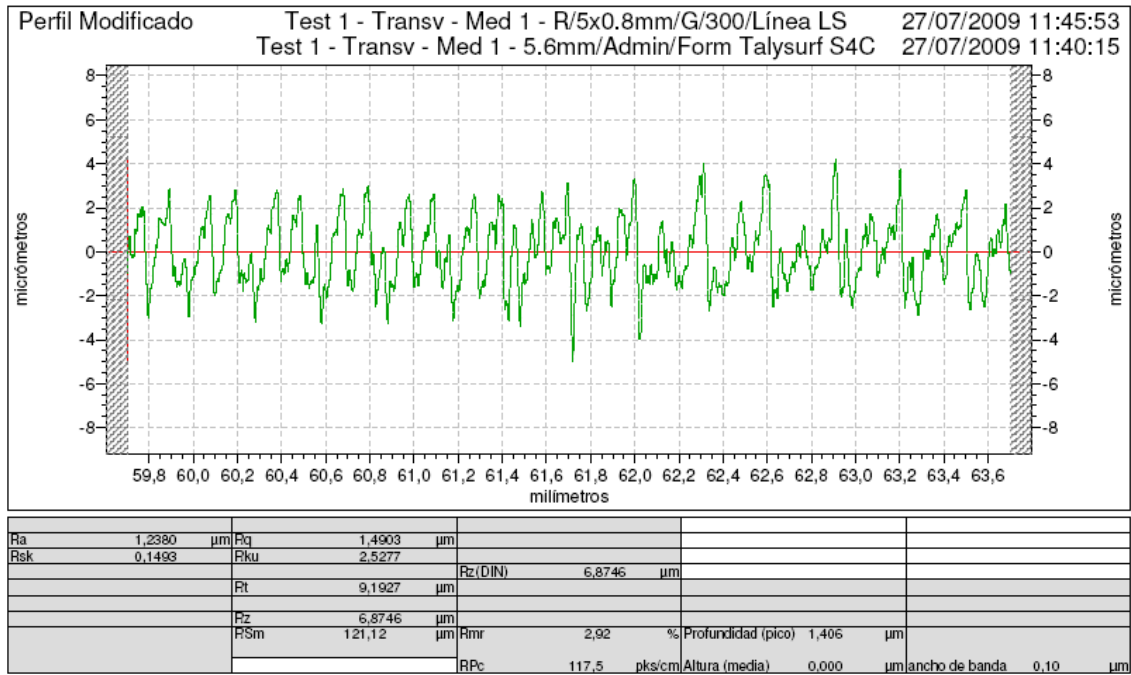


Gráfico A5- 2.Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil bruñido de la pieza

Anexo 5.2. Experimento 2- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas planas de Aluminio A96351

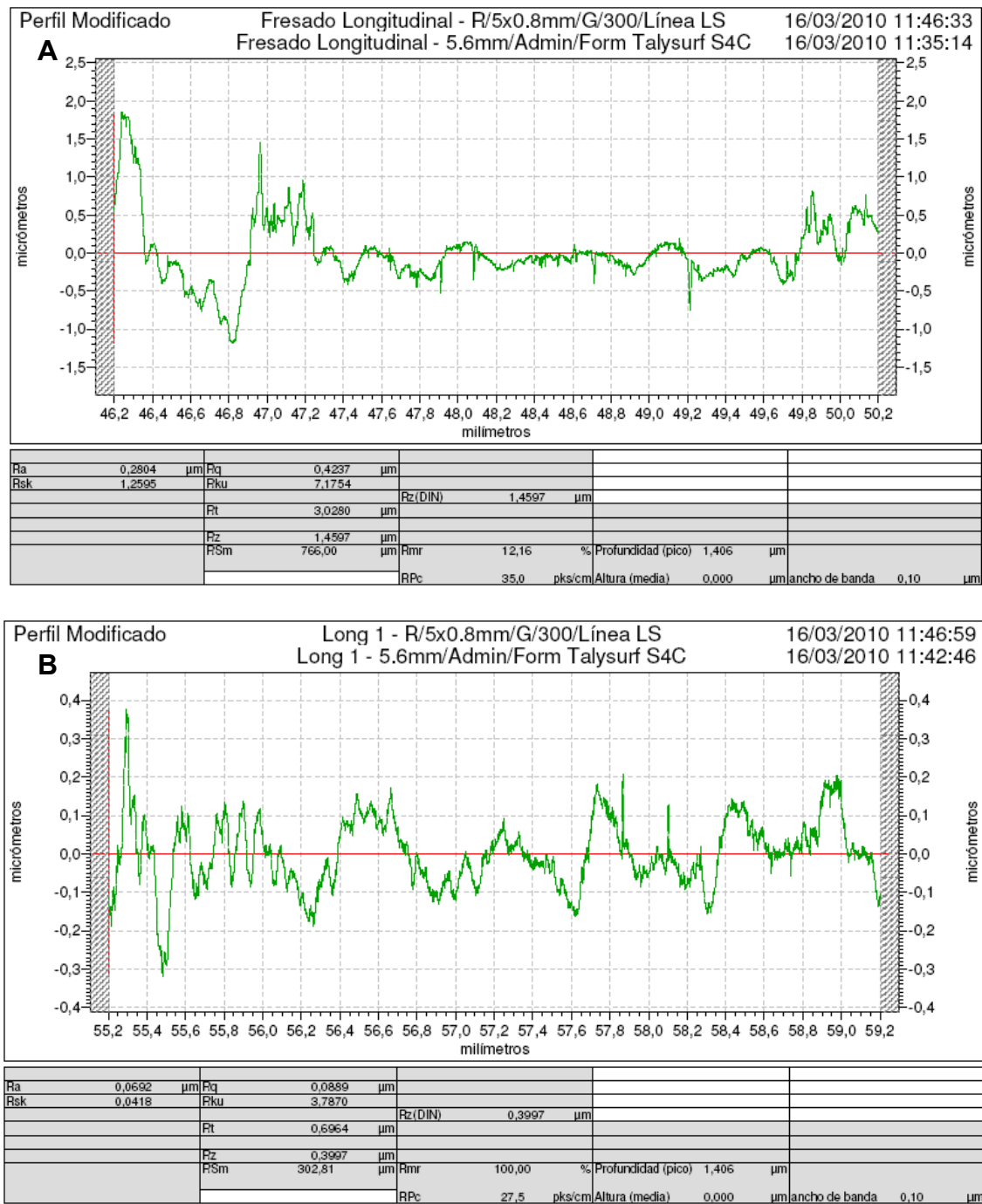


Gráfico A5- 3. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruído de la pieza

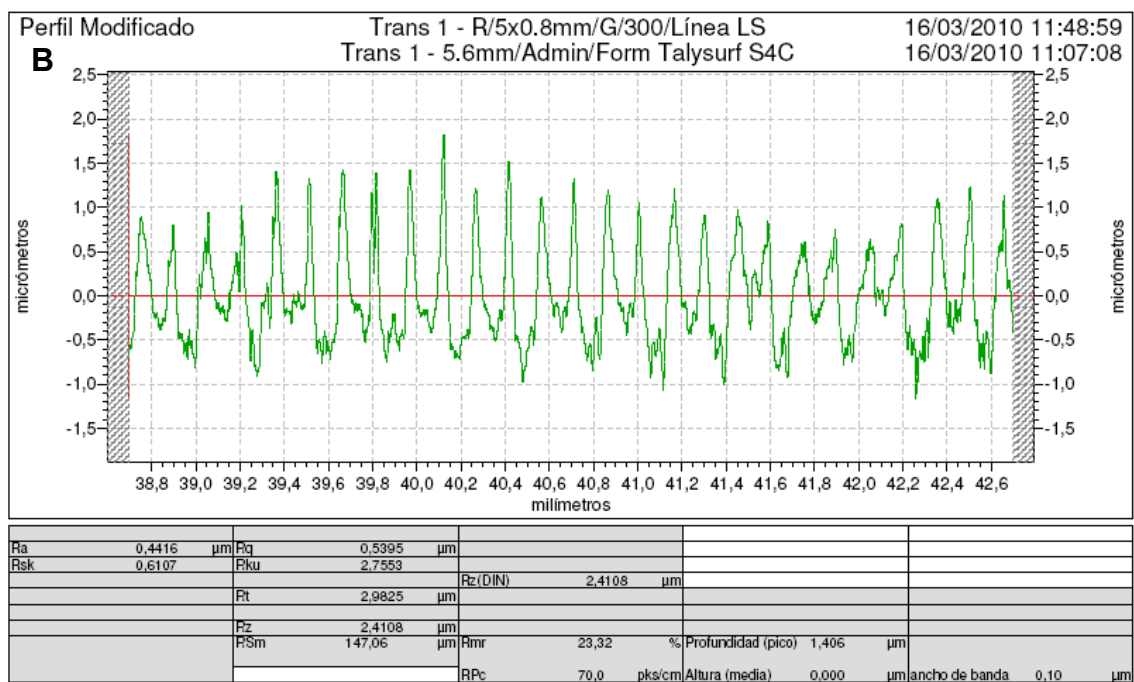
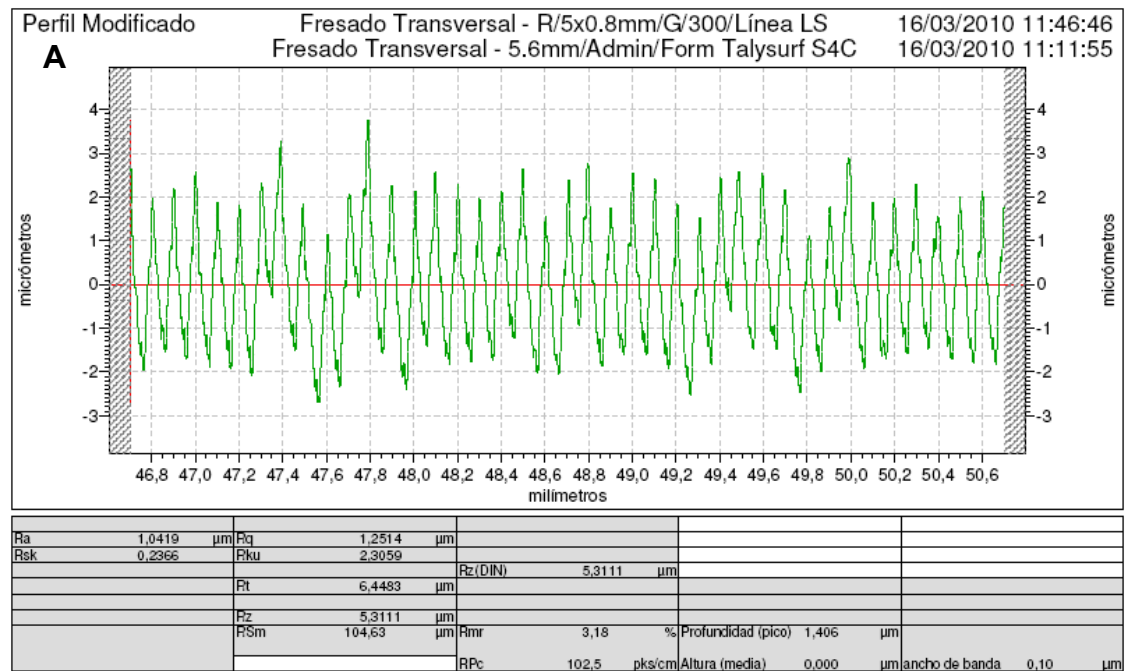


Gráfico A5- 4. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

Anexo 5.3. Experimento 3- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas planas de Aluminio A92017

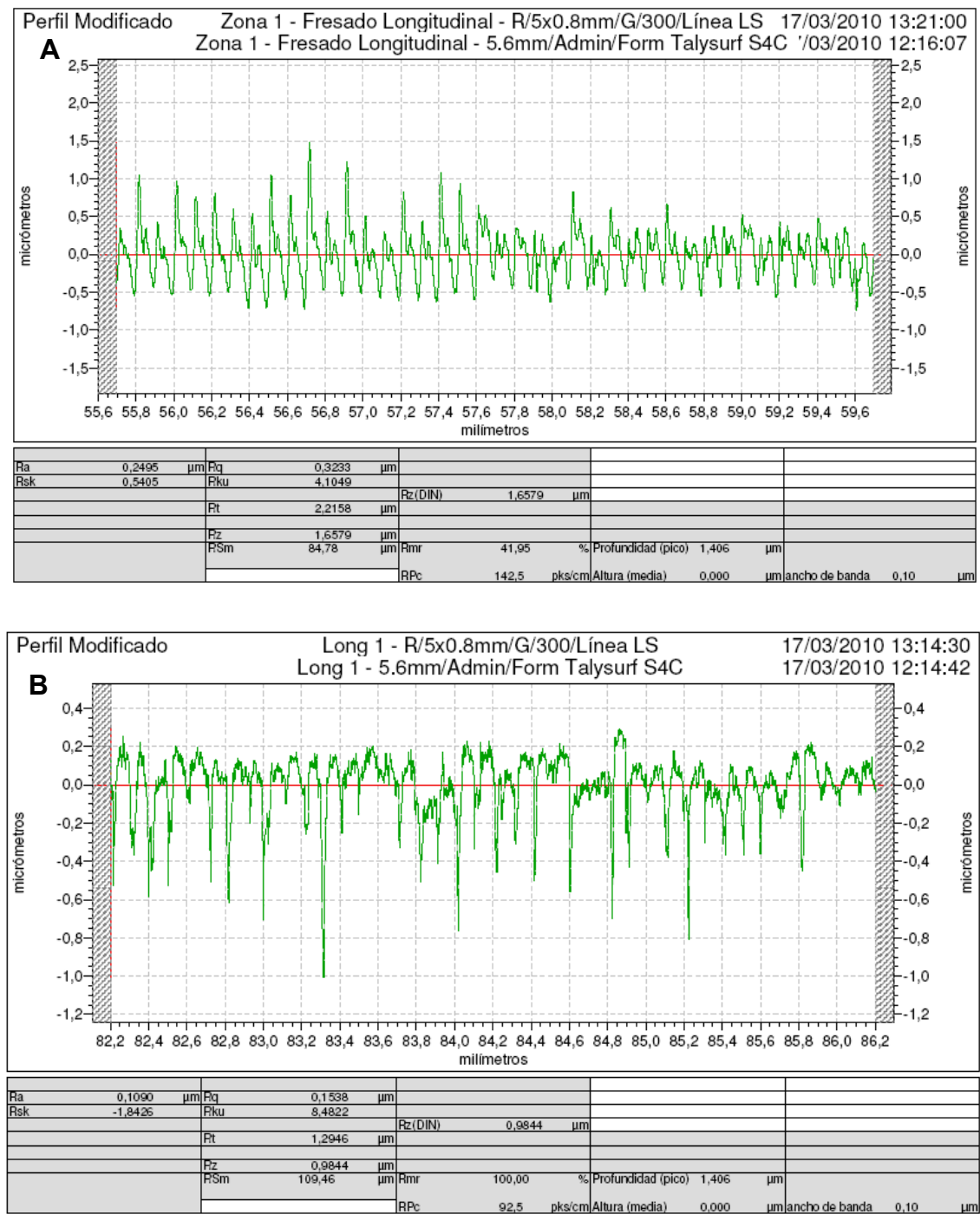


Gráfico A5- 5. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

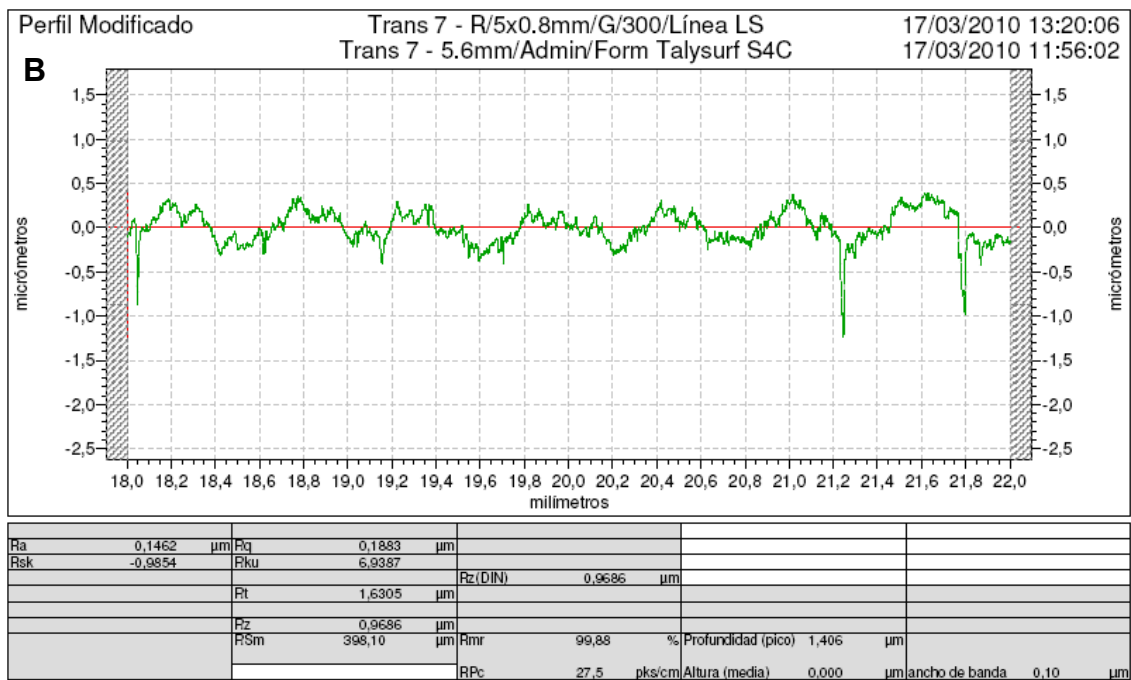
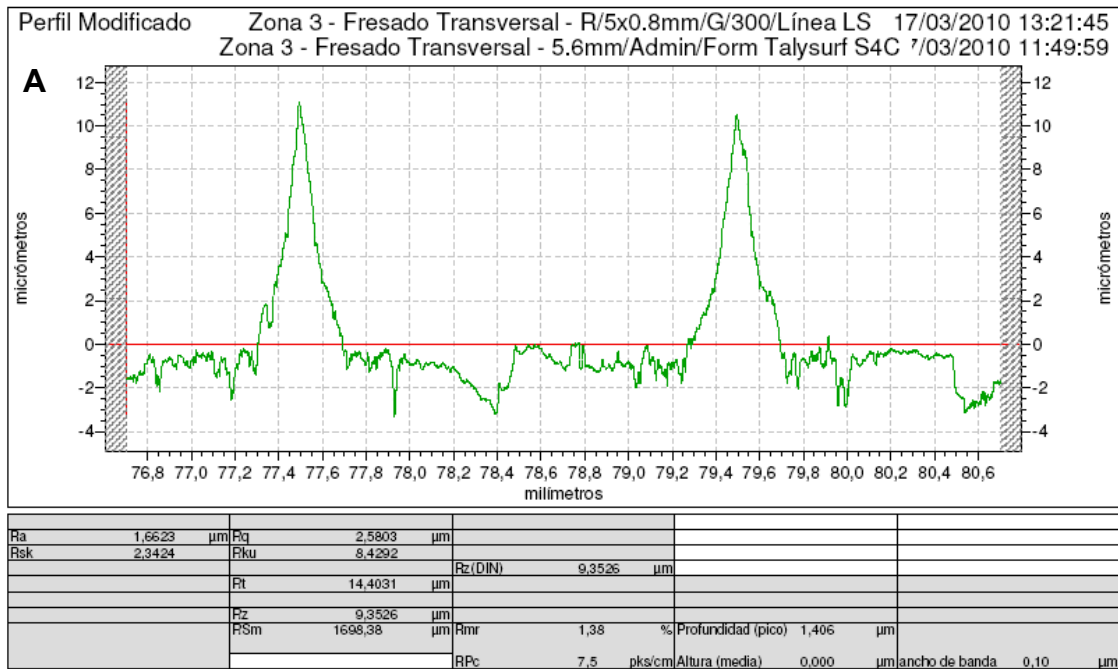
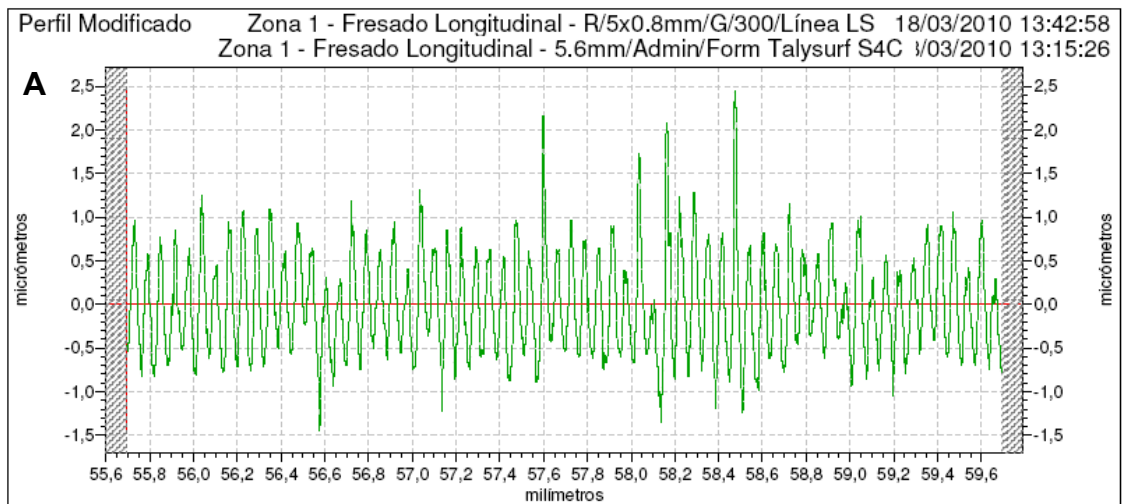
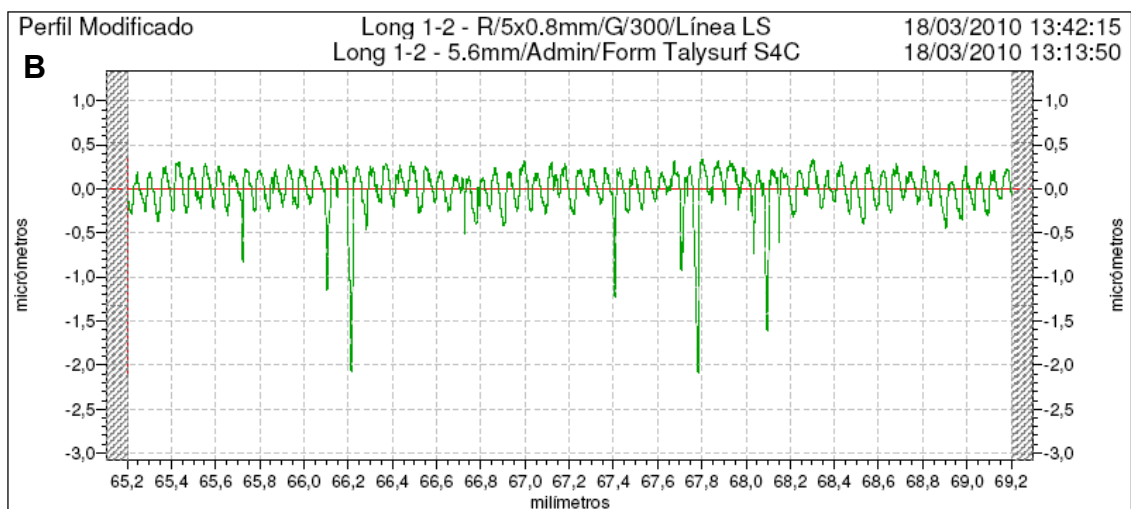


Gráfico A5- 6. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

Anexo 5.4. Experimento 4- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas planas de Acero G10380

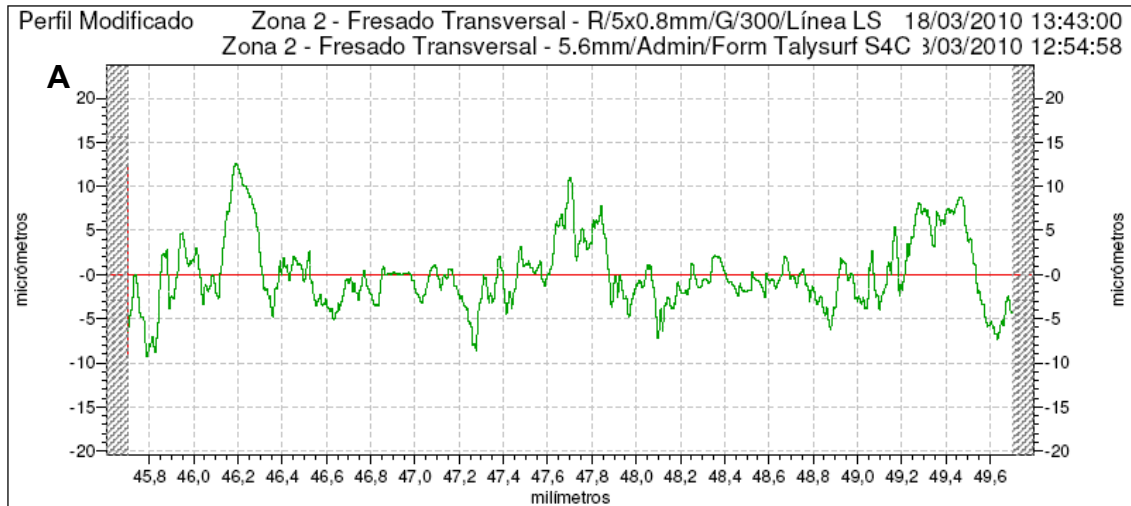


Ra	0,4515	μm	Rq	0,5534	μm				
Rsk	0,6049		Rku	3,5000		Rz(DIN)	2,7585	μm	
			Rt	3,8991	μm				
			Rz	2,7585	μm				
			RSm	63,20	μm	Rmr	2,57	%	Profundidad (pico) 1,406 μm
						RPc	160,0	pk/cm	Altura (media) 0,000 μm ancho de banda 0,10 μm

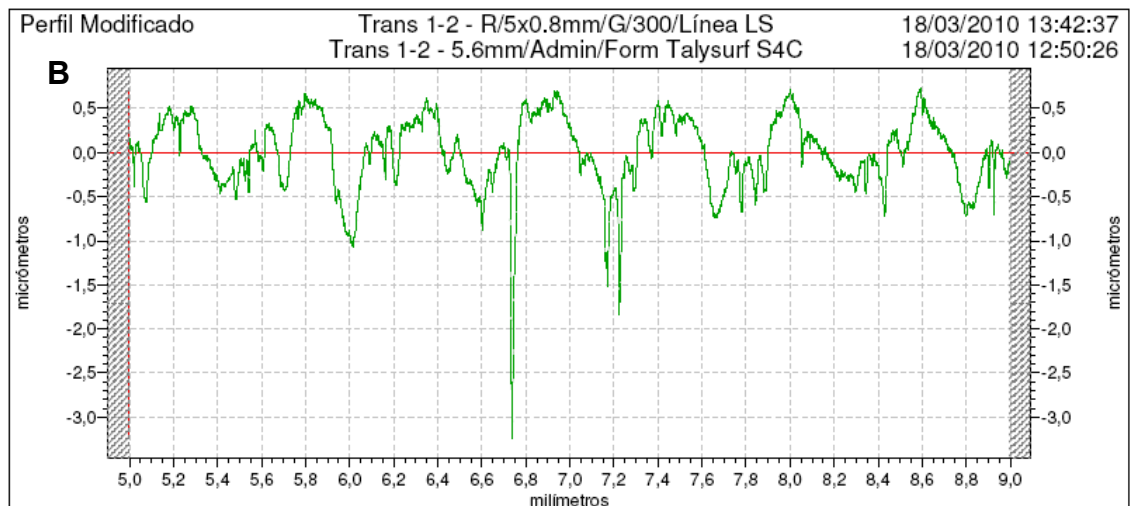


Ra	0,1687	μm	Rq	0,2534	μm				
Rsk	-3,2921		Rku	21,3570		Rz(DIN)	1,6464	μm	
			Rt	2,4212	μm				
			Rz	1,6464	μm				
			RSm	70,39	μm	Rmr	98,84	%	Profundidad (pico) 1,406 μm
						RPc	162,5	pk/cm	Altura (media) 0,000 μm ancho de banda 0,10 μm

Gráfico A5- 7. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruído de la pieza



Ra	2,8826	μm	Rq	3,8599	μm				
Rsk	0,7754		Rku	3,7142		Rz(DIN)	15,3197	μm	
			Rt	21,8874	μm				
			Rz	15,3197	μm	Rmr	0,93	% Profundidad (pico)	1,406
			RSm	240,73	μm				
						RPc	70,0	pkc/cm	Altura (media)
									0,000
									μm ancho de banda
									0,10
									μm



Ra	0,3234	μm	Rq	0,4177	μm				
Rsk	-1,2826		Rku	8,3044		Rz(DIN)	1,9611	μm	
			Rt	3,9776	μm				
			Rz	1,9611	μm	Rmr	95,43	% Profundidad (pico)	1,406
			RSm	307,69	μm				
						RPc	52,5	pkc/cm	Altura (media)
									0,000
									μm ancho de banda
									0,10
									μm

Gráfico A5- 8. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruído de la pieza

Anexo 5.5. Experimento 5- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas convexas de Aluminio A92017

Radio 50 mm

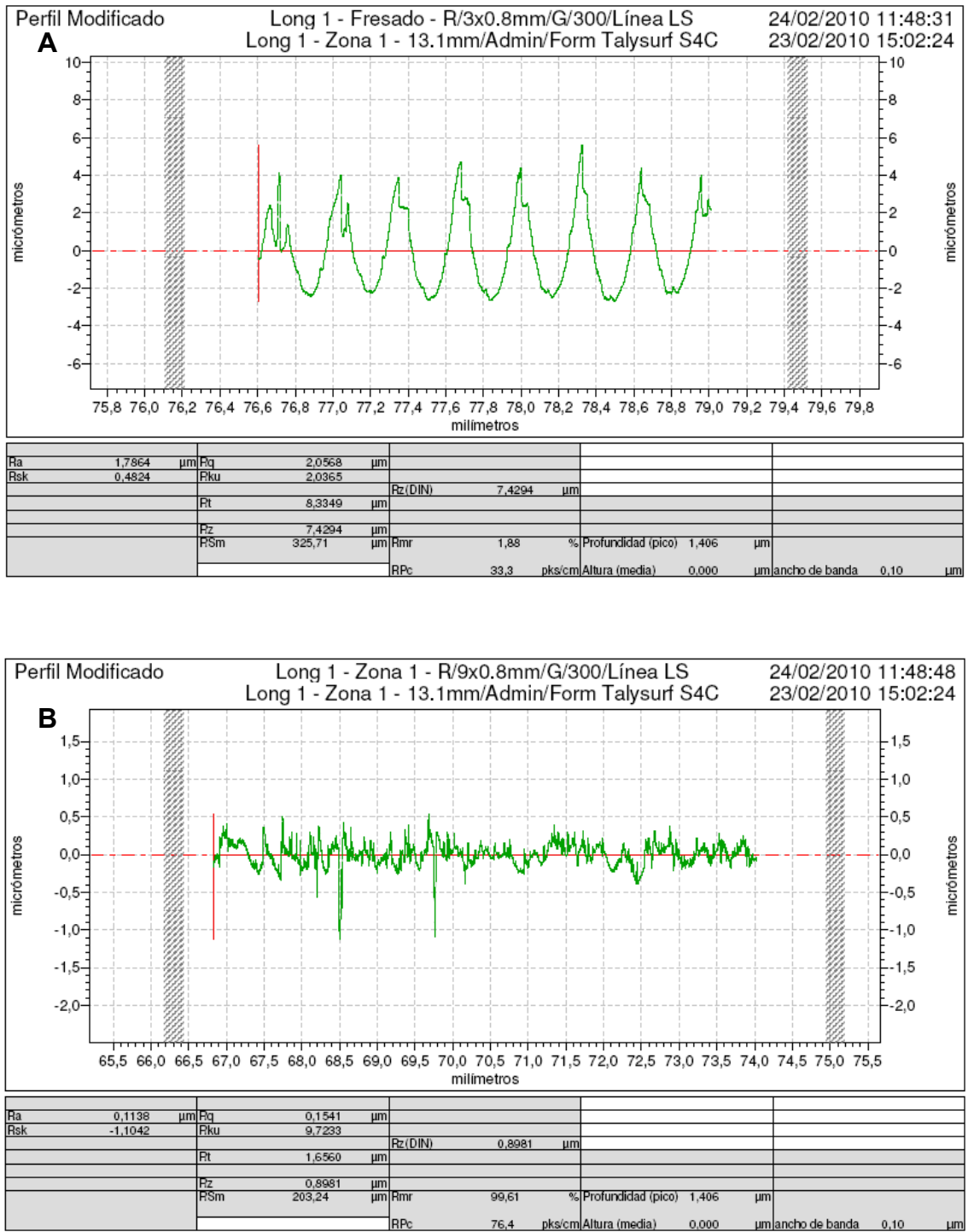


Gráfico A5- 9. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruído de la pieza

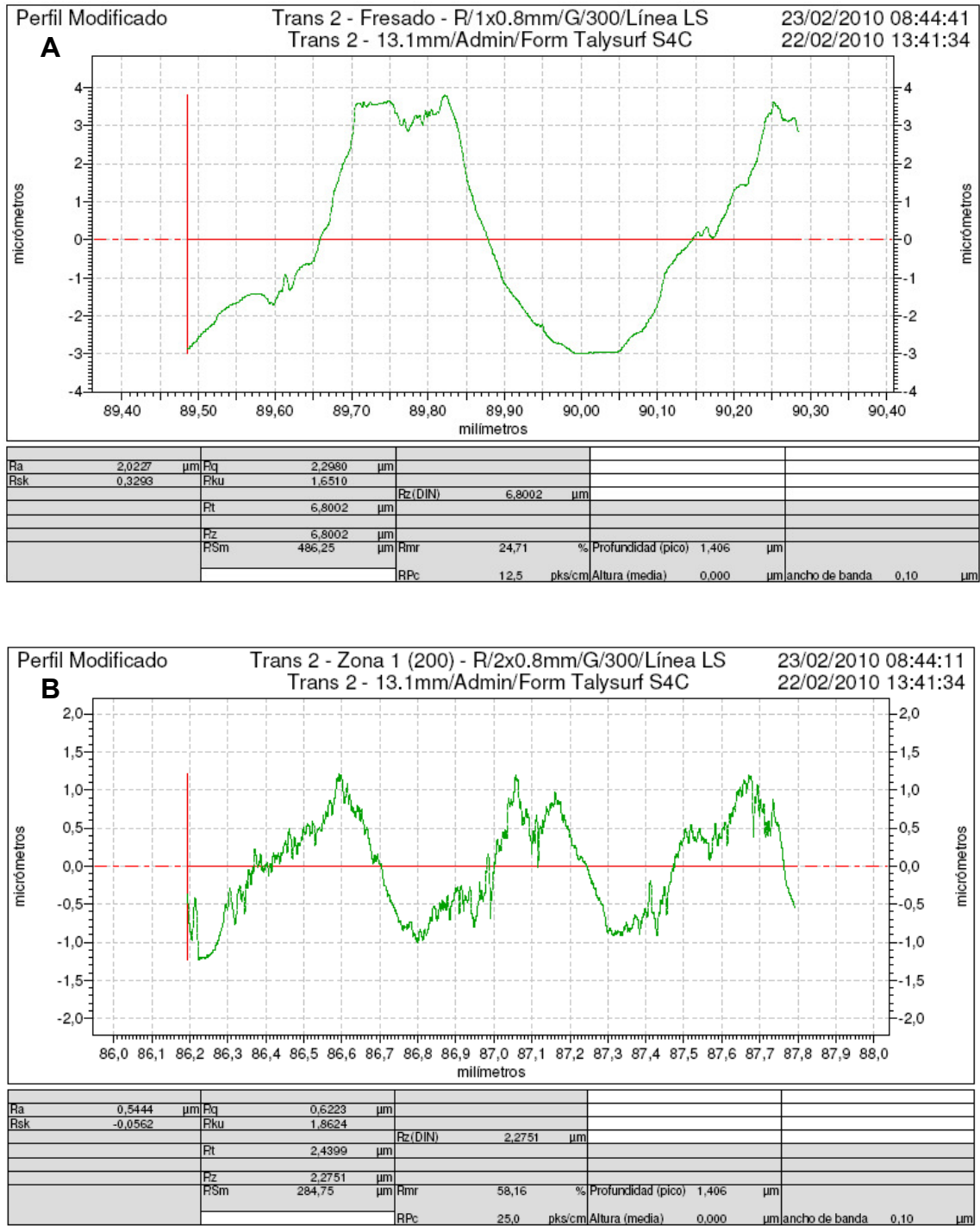


Gráfico A5- 10. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

Radio 100 mm

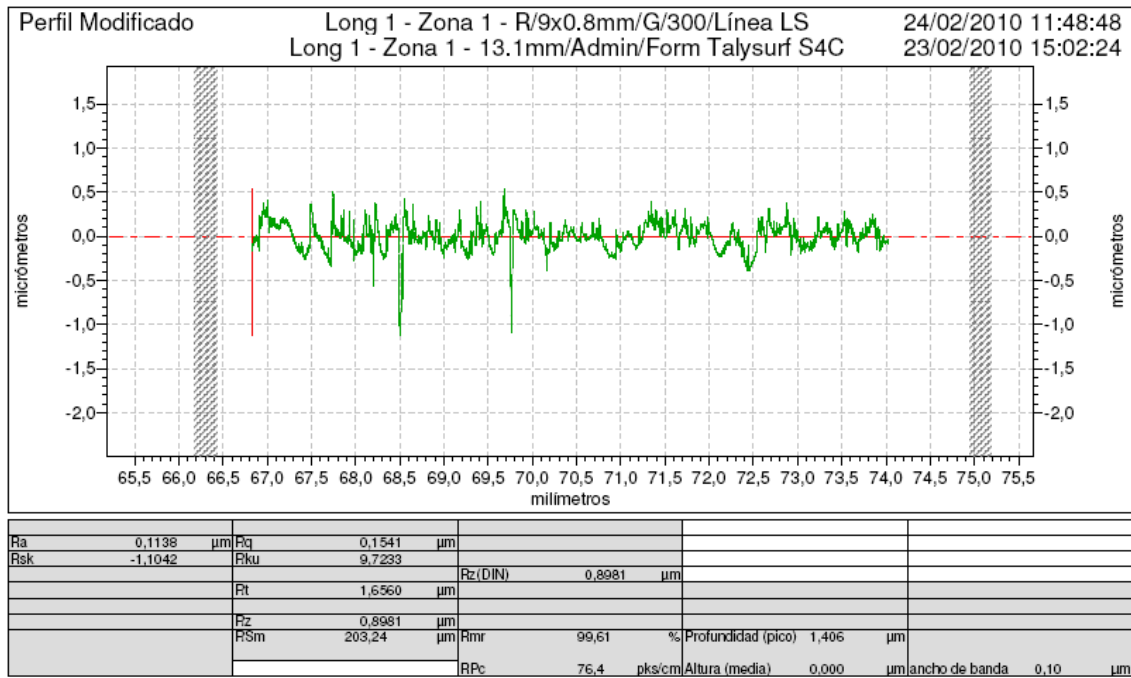


Gráfico A5- 11. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil bruñado de la pieza

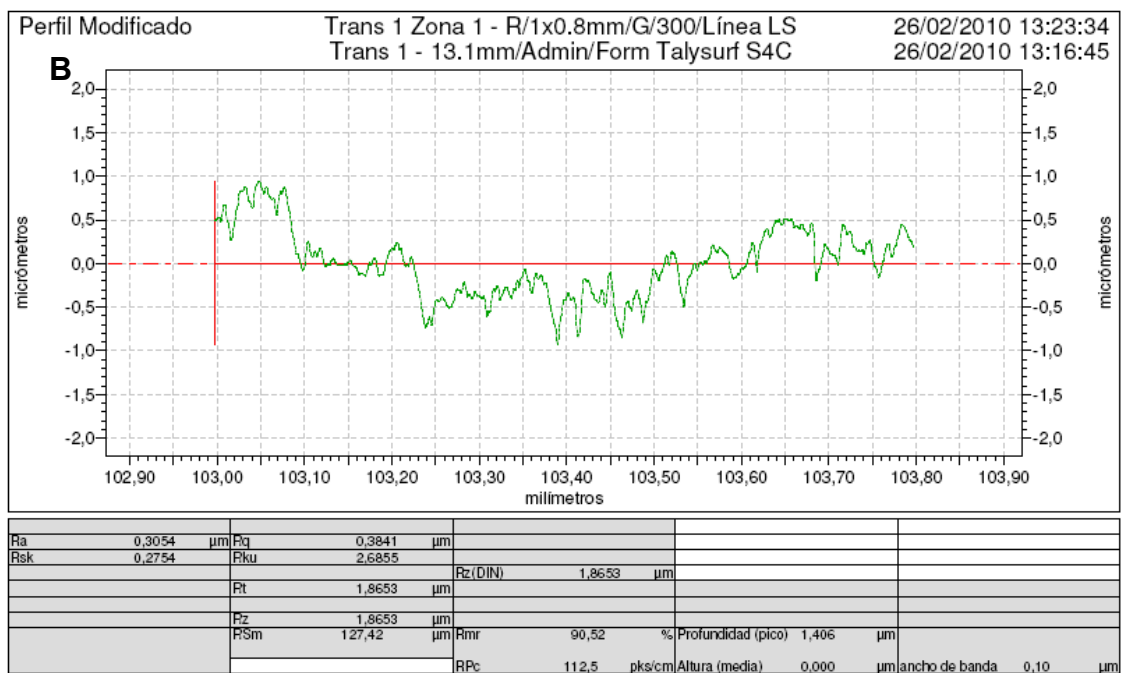
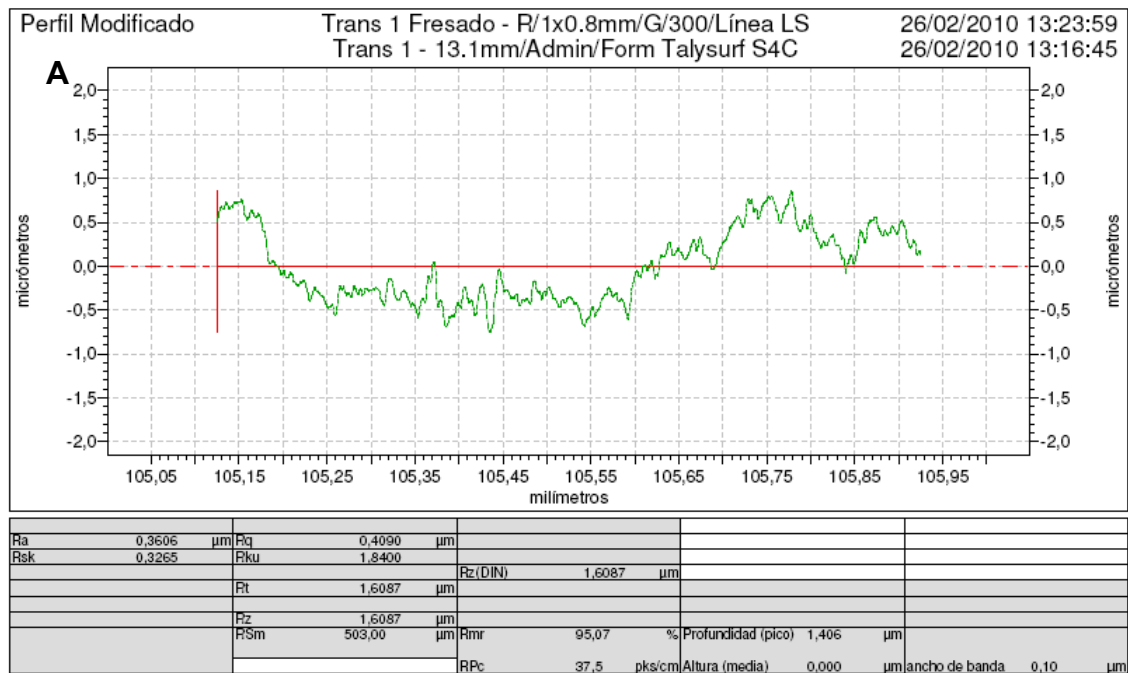
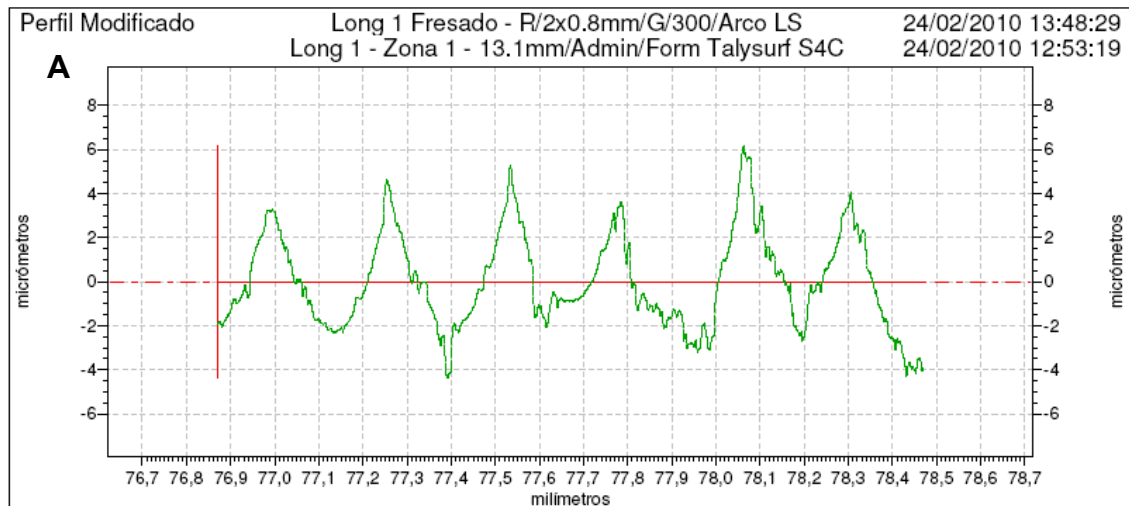


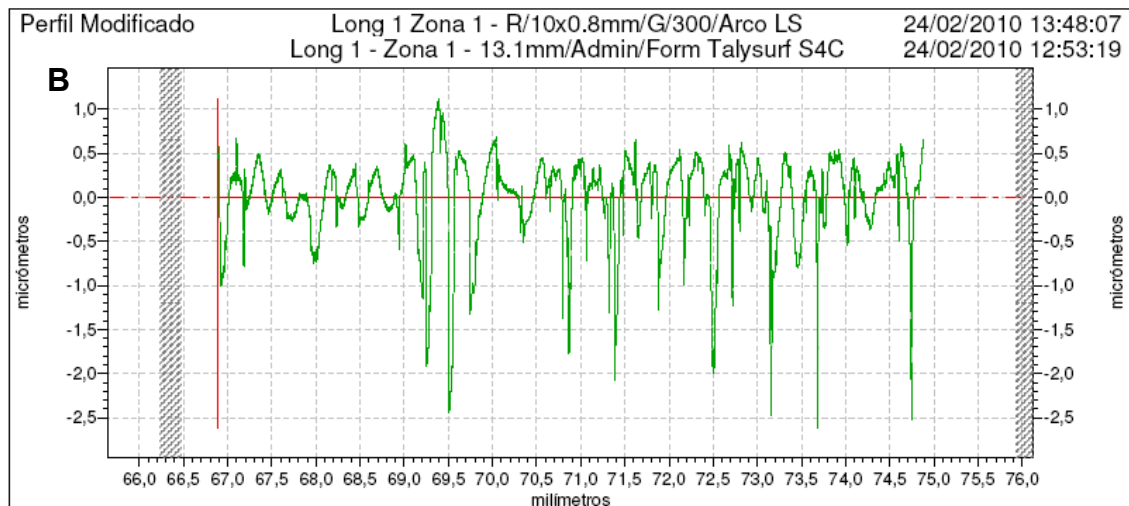
Gráfico A5- 12. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruído de la pieza

Anexo 5.6. Experimento 6- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas convexas de Acero G10380

Radio 50 mm

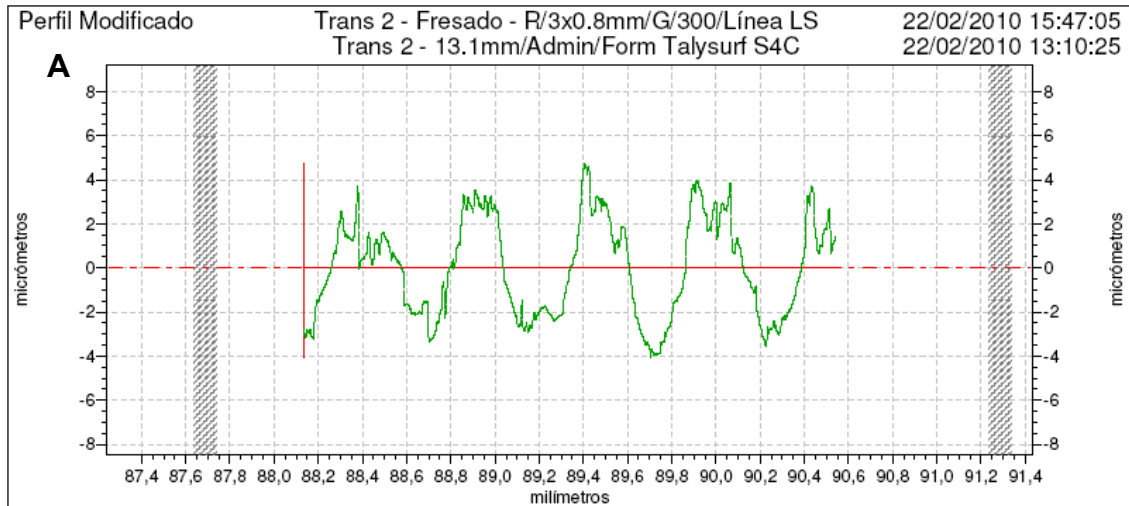


Radio	41,6401	mm					
Ra	1,7657	μm	Rq	2,1457	μm		
Rsk	0,4391		Rku	2,6203			
			Rt	10,5120	μm	Rz(DIN)	10,0596 μm
			Rz	10,0596	μm		
			RSm	254,21	μm	Rmr	2,03 % Profundidad (pico) 1,406 μm
						RPc	43,7 pks/cm Altura (media) 0,000 μm ancho de banda 0,10 μm

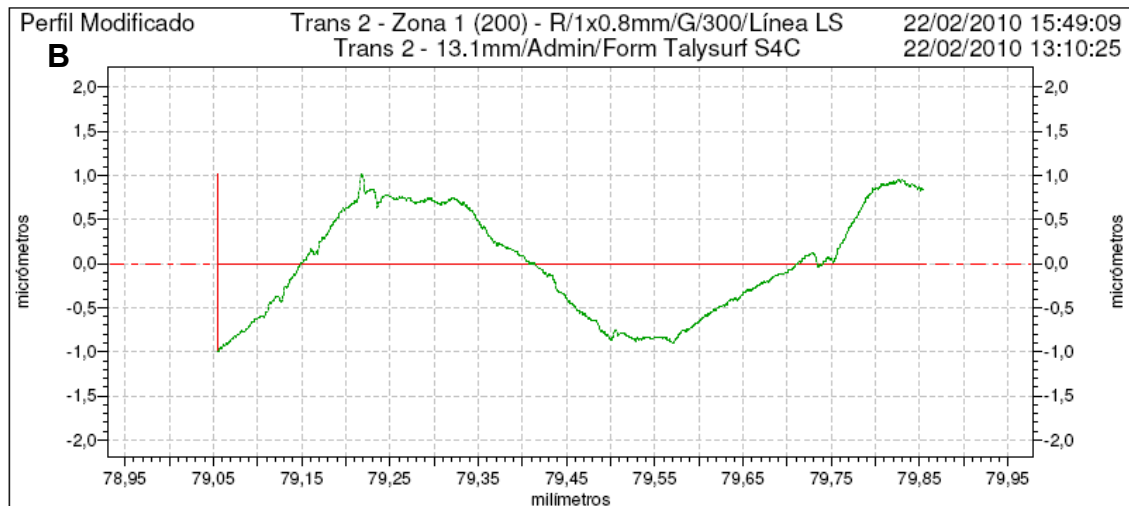


Radio	49,3824	mm					
Ra	0,3384	μm	Rq	0,4916	μm		
Rsk	-1,8928		Rku	8,0838			
			Rt	3,7300	μm	Rz(DIN)	2,5138 μm
			Rz	2,5138	μm		
			RSm	246,70	μm	Rmr	83,48 % Profundidad (pico) 1,406 μm
						RPc	55,0 pks/cm Altura (media) 0,000 μm ancho de banda 0,10 μm

Gráfico A5- 13. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza



Ra	1,9533	μm	Rq	2,2245	μm				
Rsk	0,0776		Rku	1,7874		Rz(DIN)	7,9231	μm	
			Rt	8,7842	μm				
			Rz	7,9231	μm	Rmr	5,14	% Profundidad (pico)	1,406
			RSm	531,94	μm				
						RPc	16,7	pk/cm	Altura (media)
								0,000	μm ancho de banda
									0,10
									μm



Ra	0,5230	μm	Rq	0,5996	μm				
Rsk	0,0326		Rku	1,6318		Rz(DIN)	2,0223	μm	
			Rt	2,0223	μm				
			Rz	2,0223	μm	Rmr	66,60	% Profundidad (pico)	1,406
			RSm	562,50	μm				
						RPc	12,5	pk/cm	Altura (media)
								0,000	μm ancho de banda
									0,10
									μm

Gráfico A5- 14. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruído de la pieza

Radio 100 mm

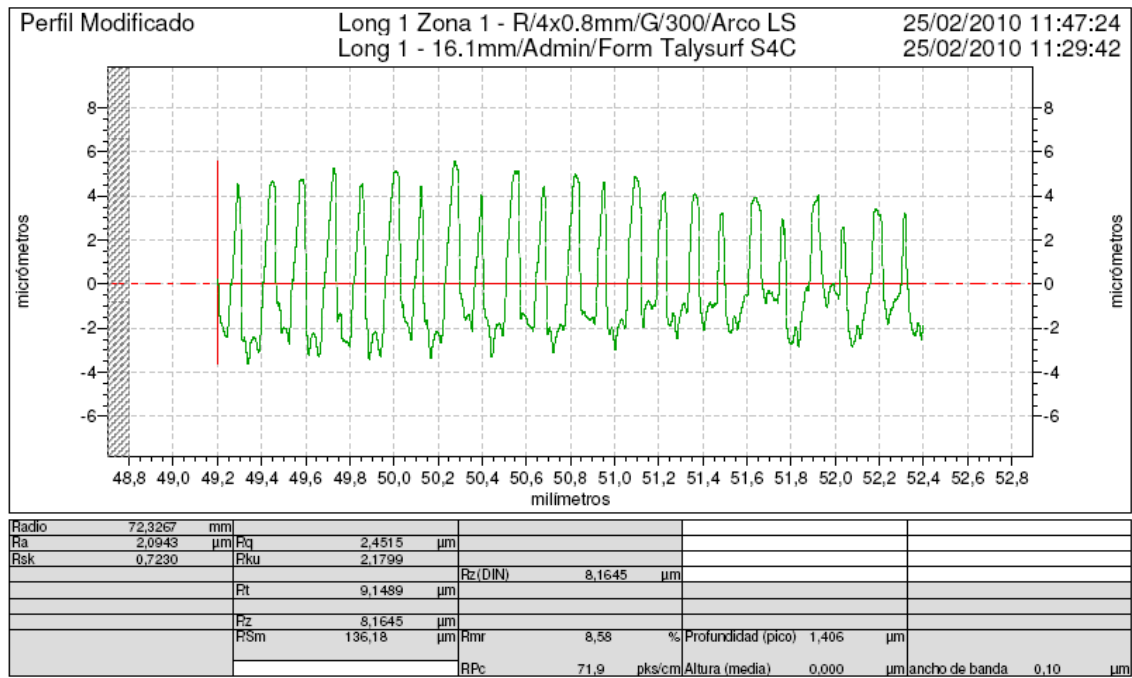


Gráfico A5- 15. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil bruñido de la pieza

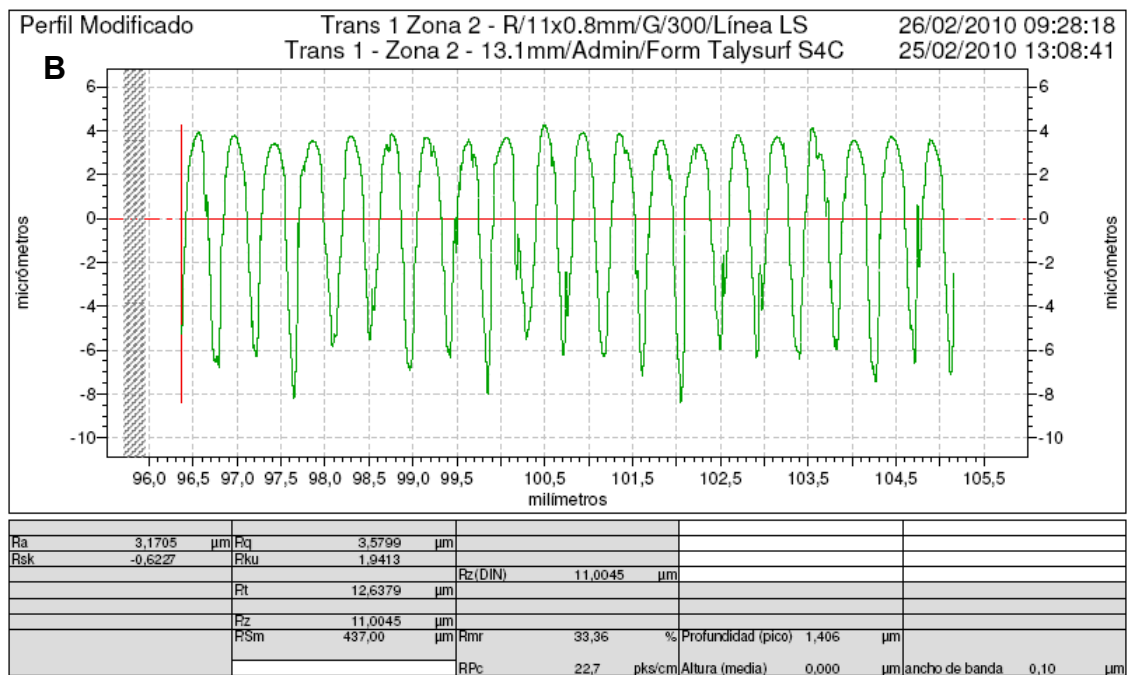
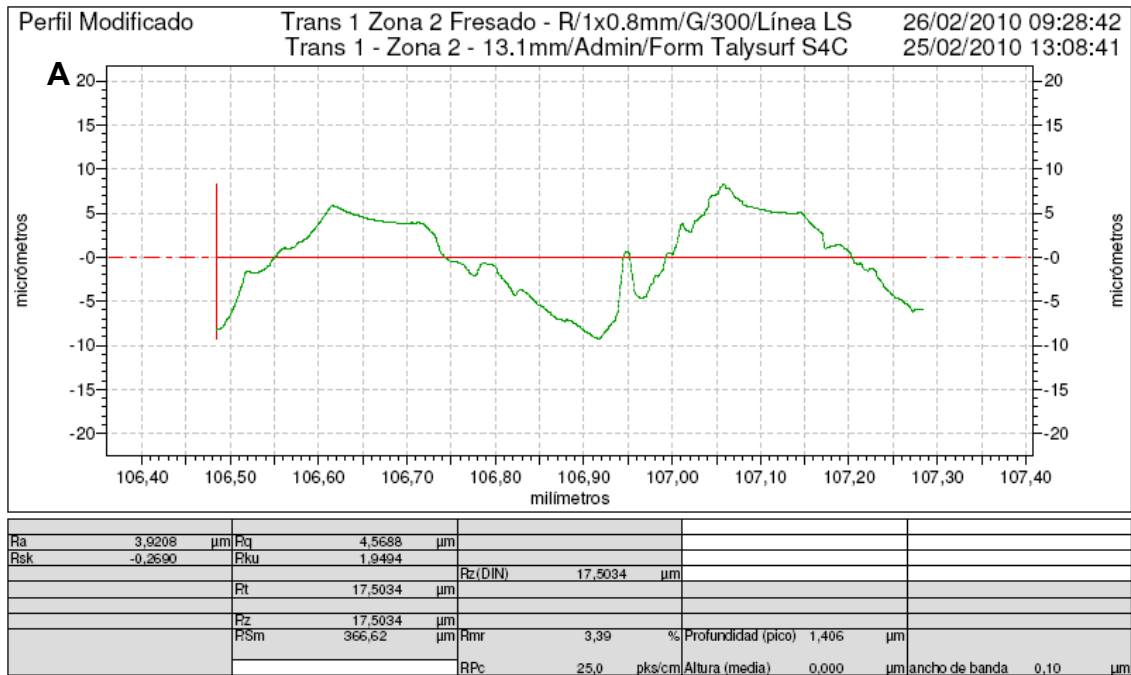
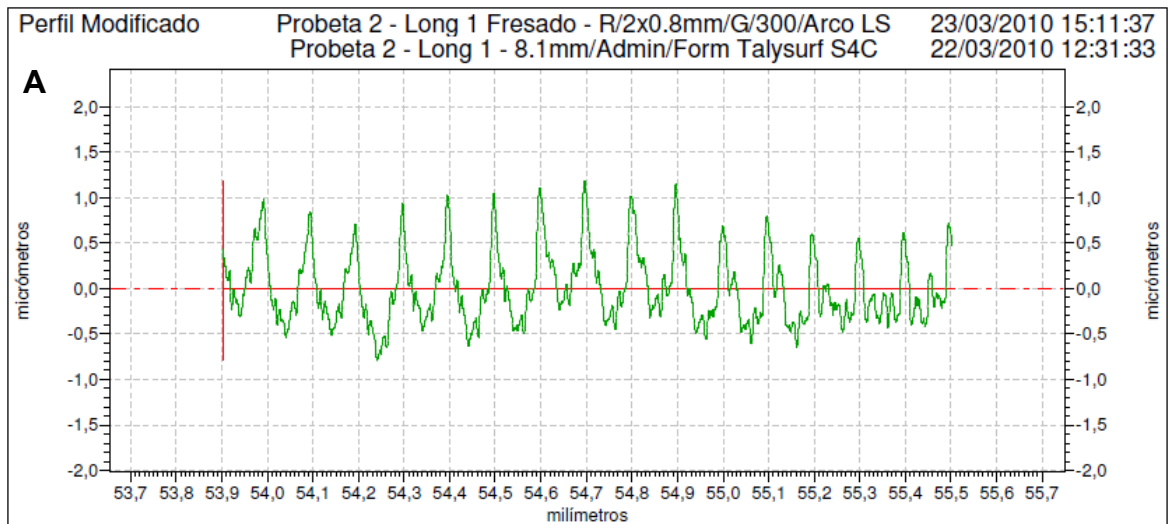


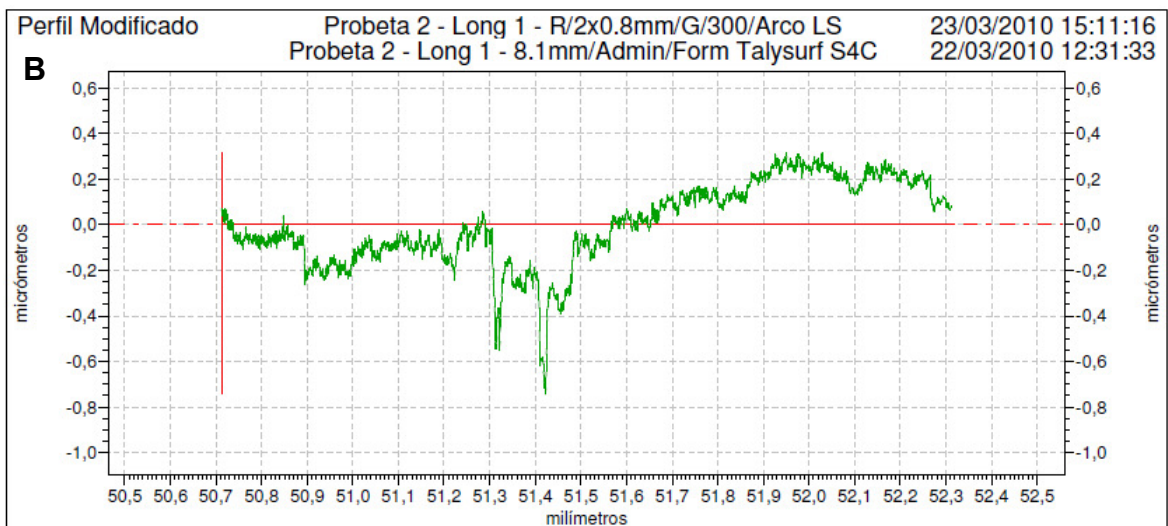
Gráfico A5- 16. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruído de la pieza

Anexo 5.7. Experimento 7- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas cóncavas de Aluminio A92017

Radio 50 mm



Radio	45,6646	mm							
Ra	0,3155	μm	Rq	0,3922	μm				
Rsk	0,8143		Rku	3,0946					
			Rt	1,9708	μm	Rz(DIN)	1,8815	μm	
			Rz	1,8815	μm				
			RSm	93,40	μm	Rmr	66,98	%	Profundidad (pico)
									1,406 μm
						RPc	131,3	pk/cm	Altura (media)
									0,000 μm
									ancho de banda
									0,10 μm



Radio	50,4324	mm							
Ra	0,1506	μm	Rq	0,1816	μm				
Rsk	-0,4723		Rku	3,2857					
			Rt	1,0582	μm	Rz(DIN)	0,6416	μm	
			Rz	0,6416	μm				
			RSm	441,63	μm	Rmr	100,00	%	Profundidad (pico)
									1,406 μm
						RPc	12,5	pk/cm	Altura (media)
									0,000 μm
									ancho de banda
									0,10 μm

Gráfico A5- 17. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

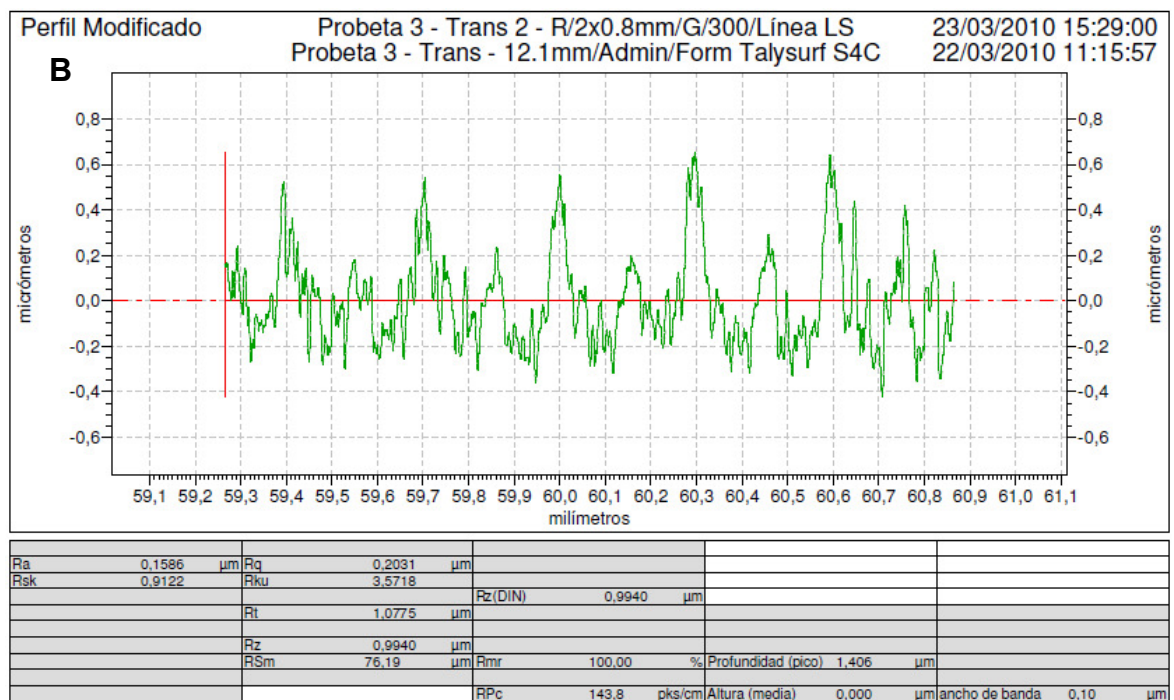
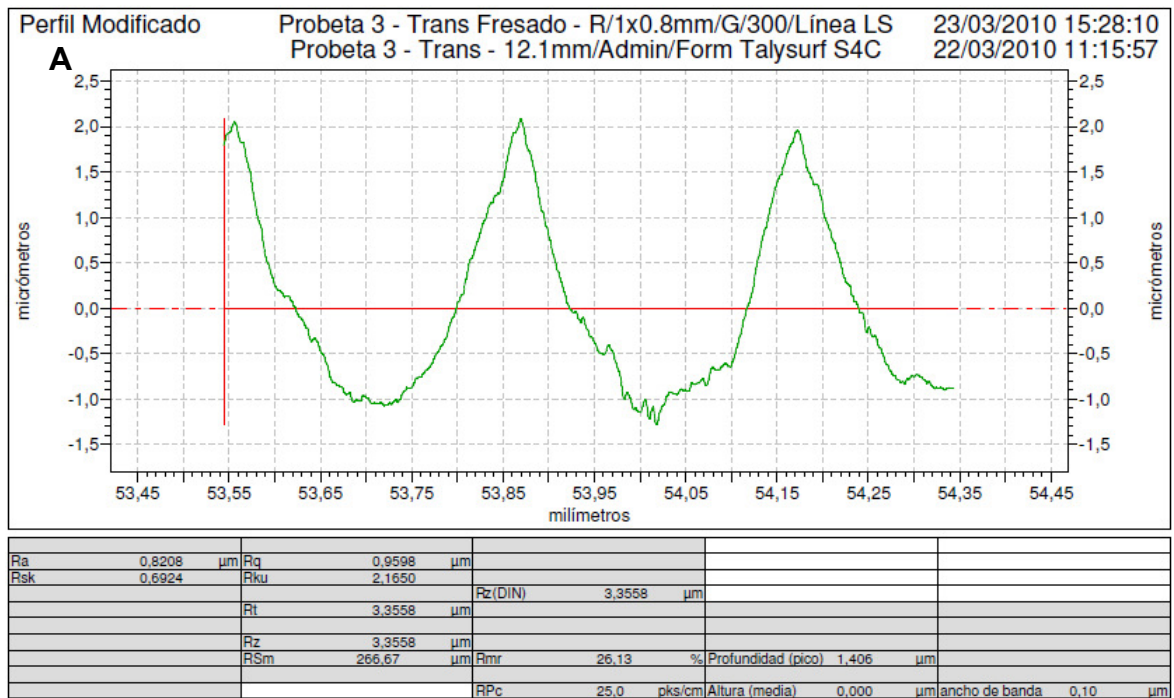


Gráfico A5- 18. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

Radio 100 mm

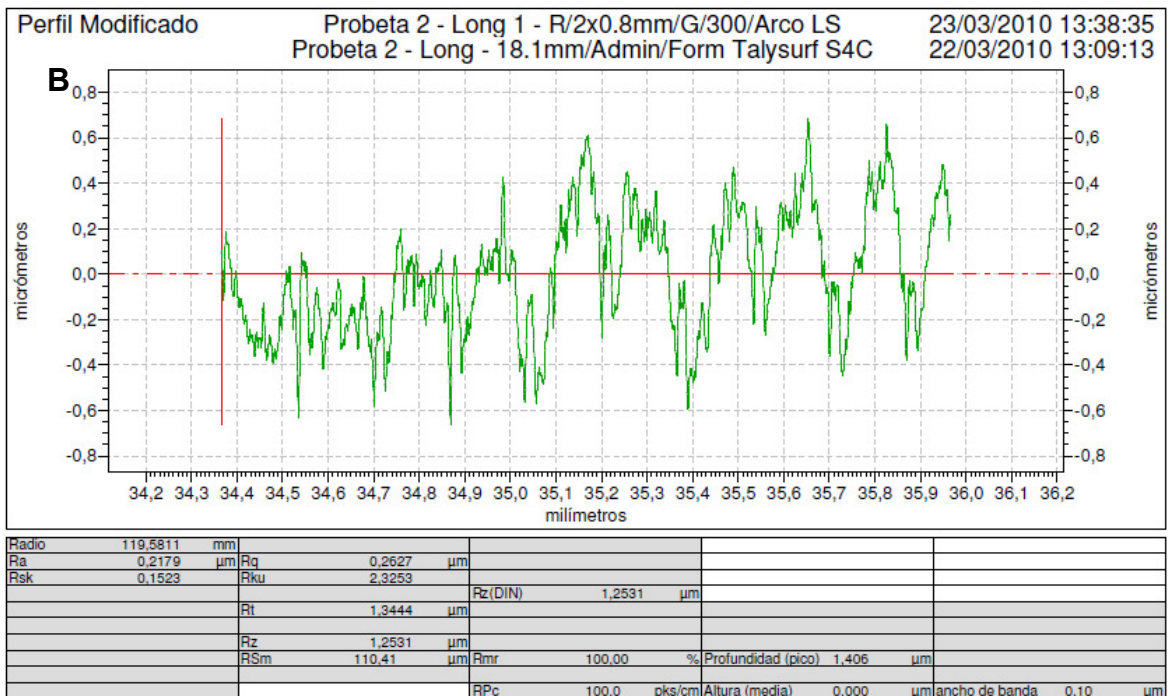
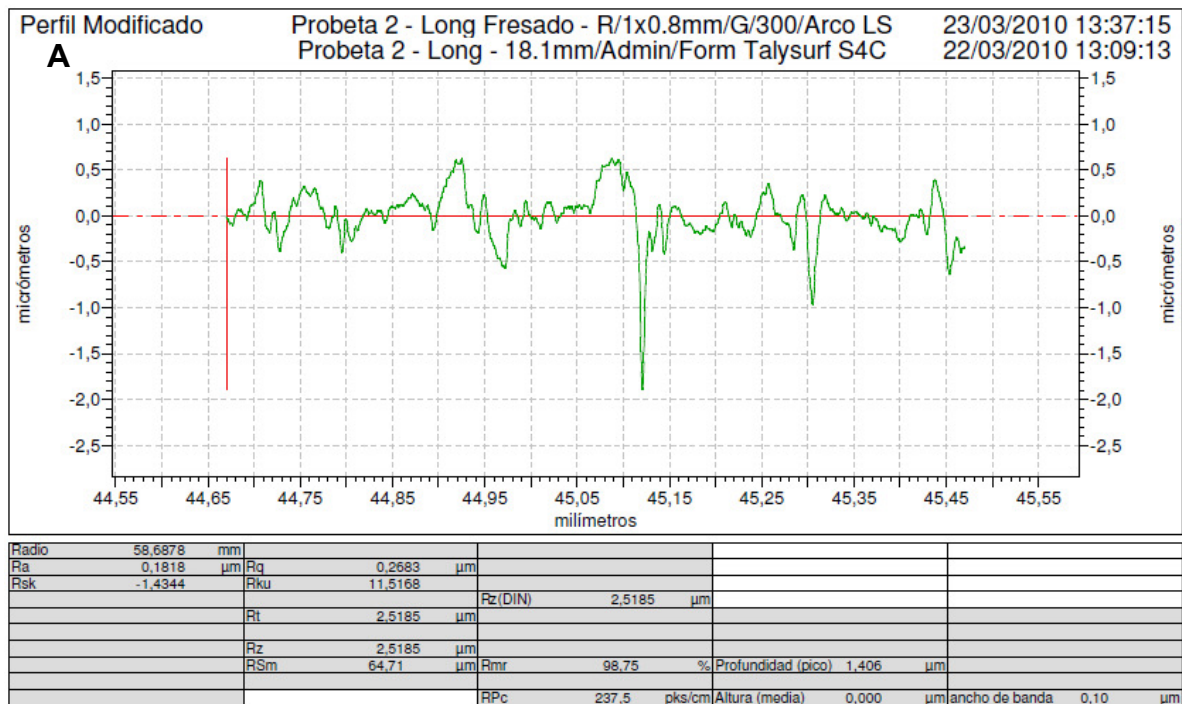


Gráfico A5- 19. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

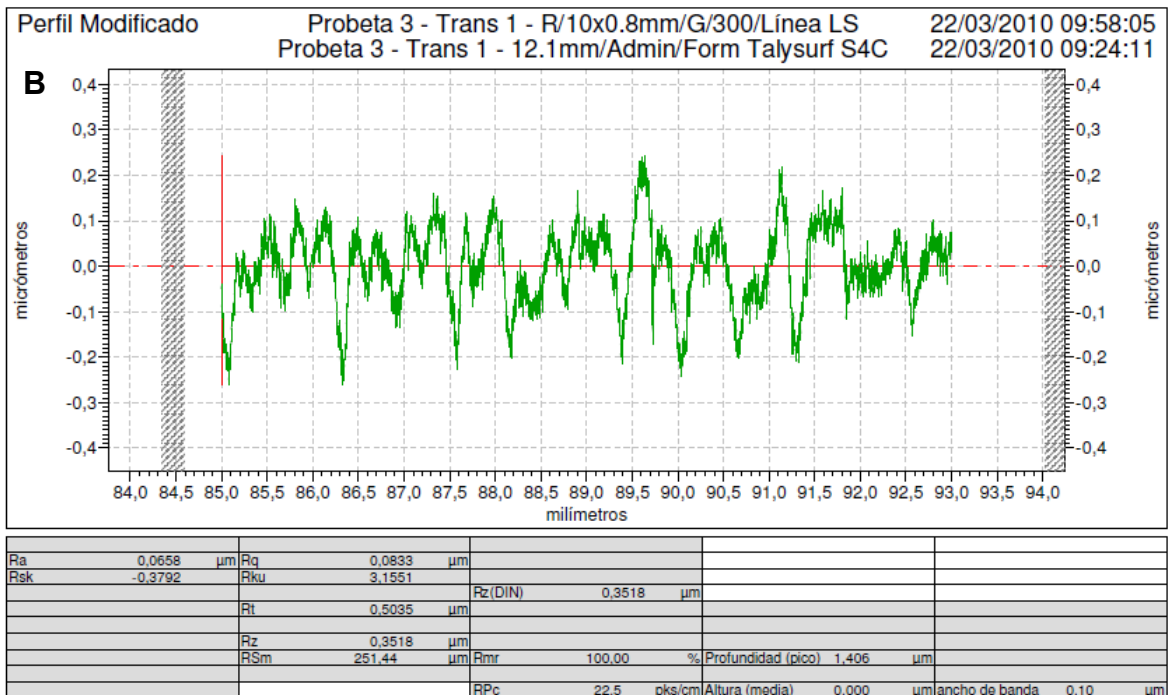
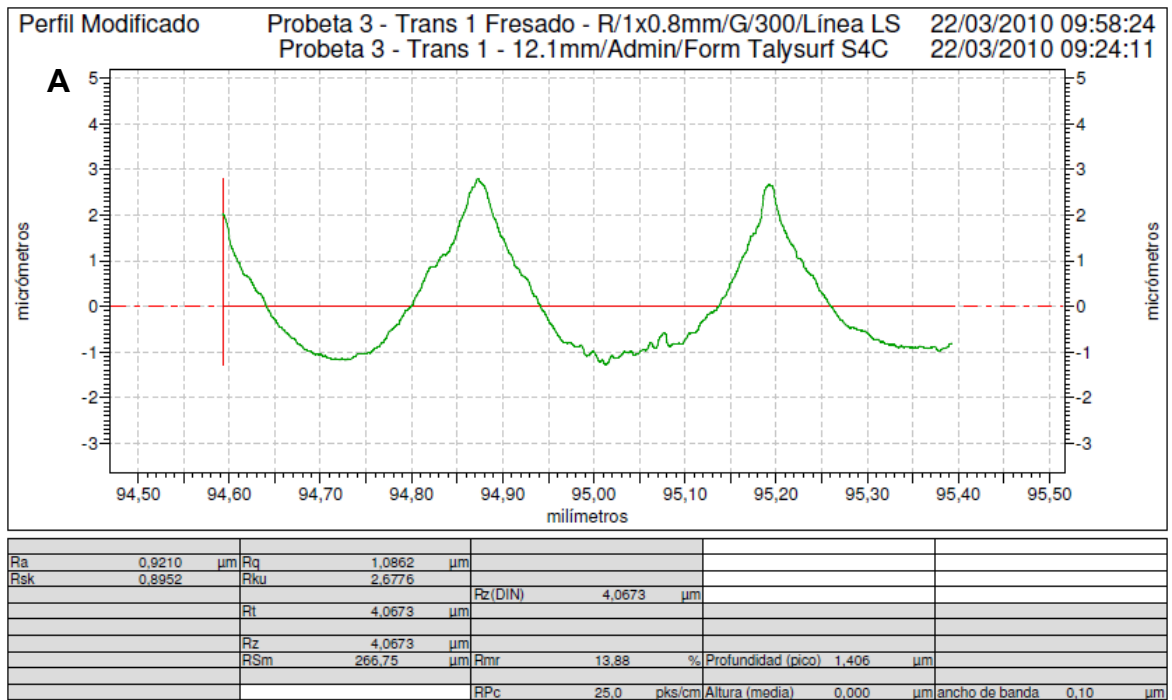


Gráfico A5- 20. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

Anexo 5.8. Experimento 8- Mediciones de Rugosidad superficial en piezas cóncavas de Acero G10380

Radio 50 mm

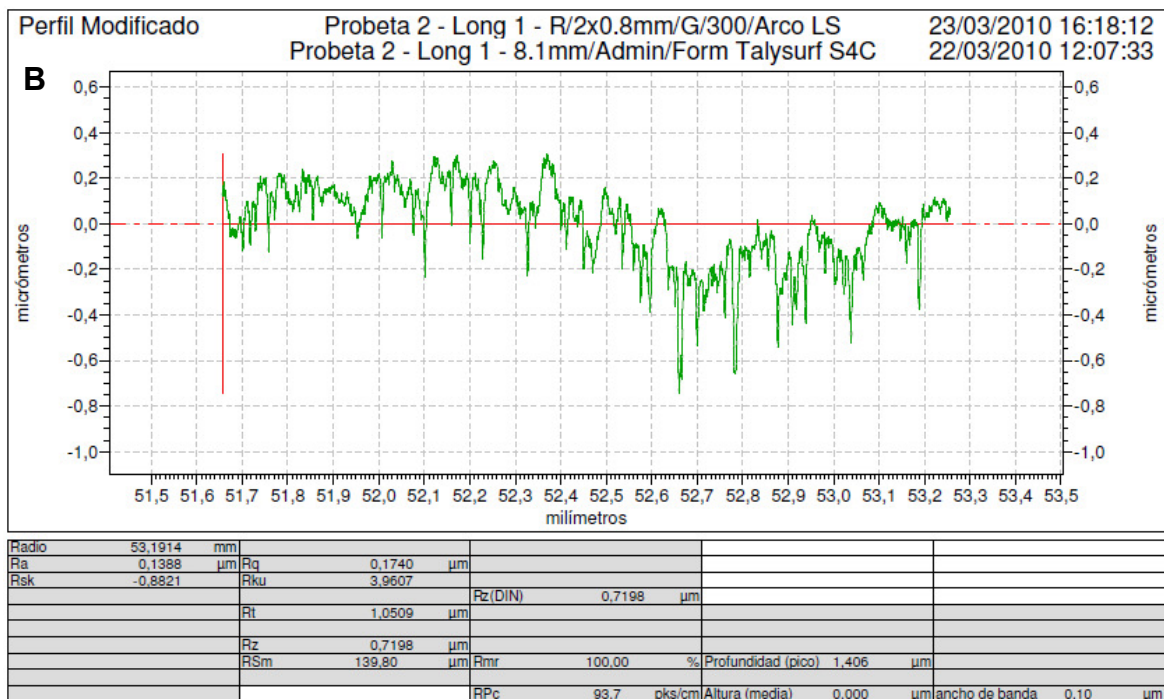
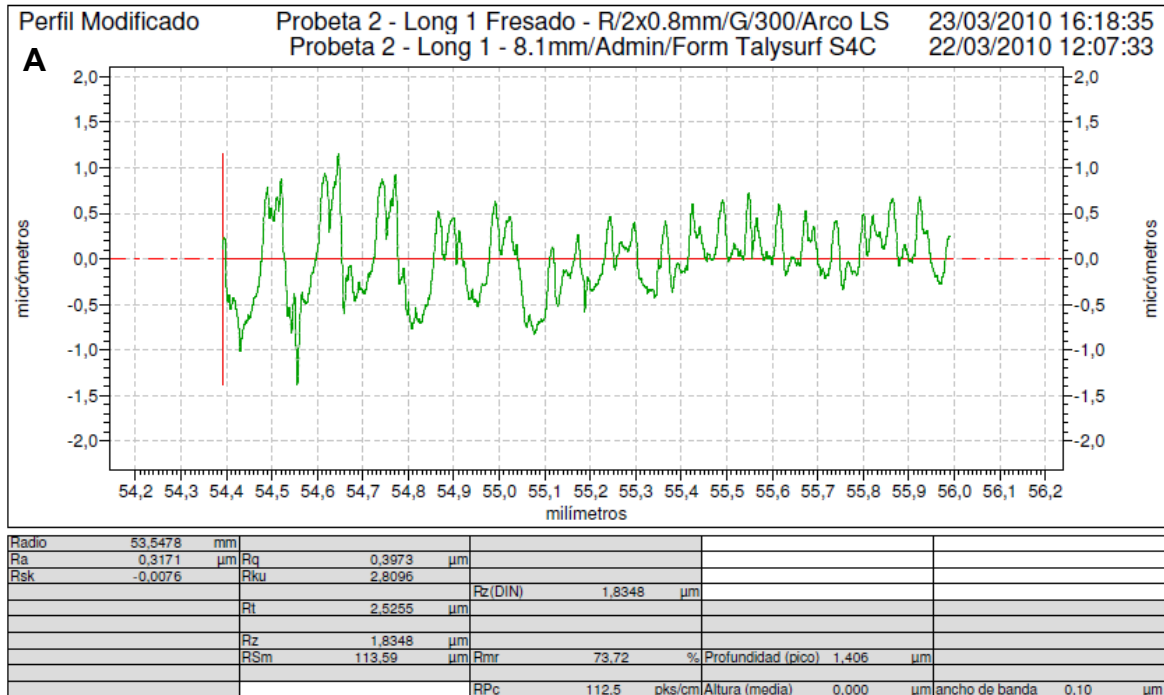


Gráfico A5- 21. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

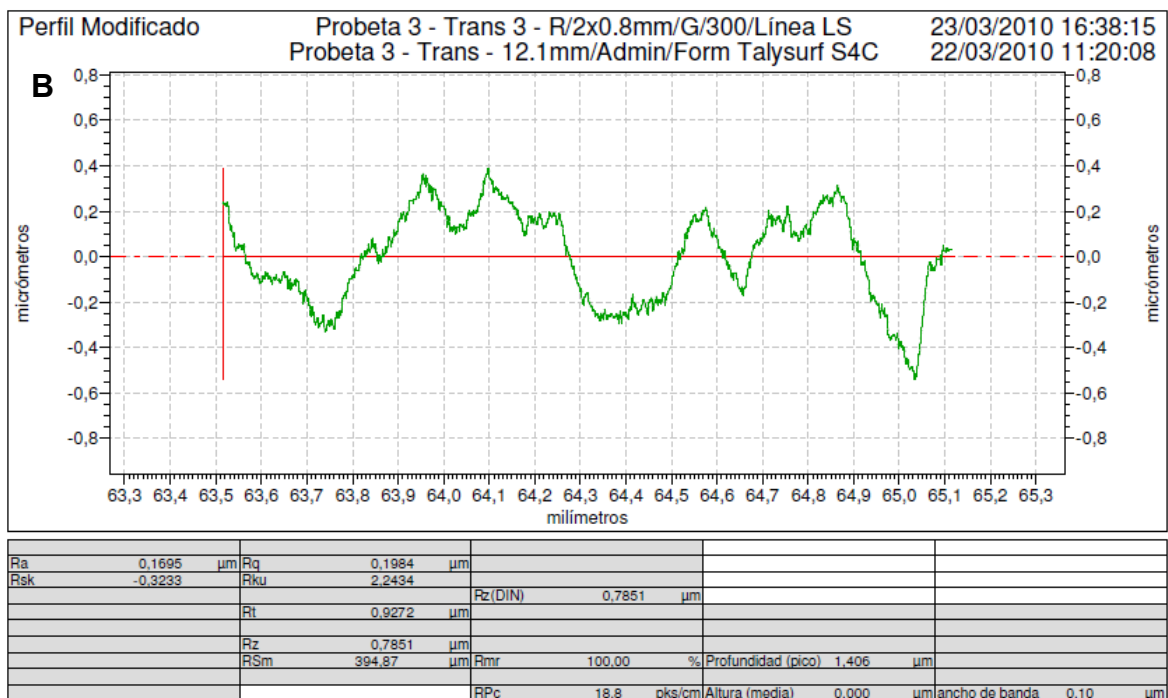
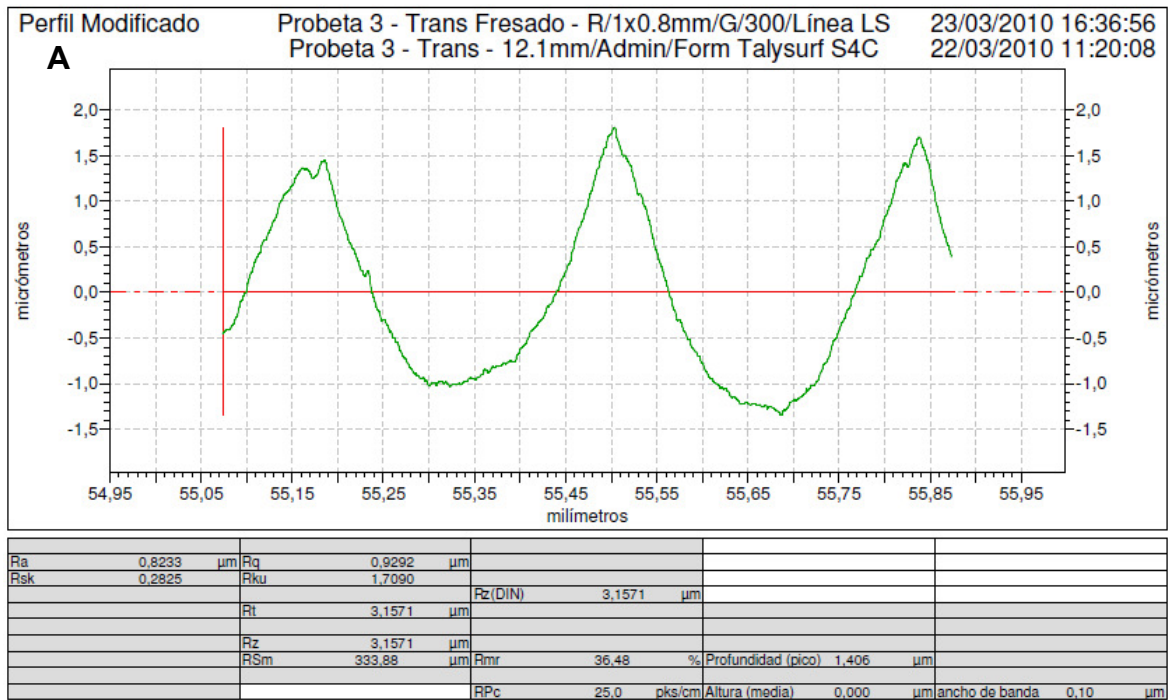


Gráfico A5- 22. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruído de la pieza

Radio 100 mm

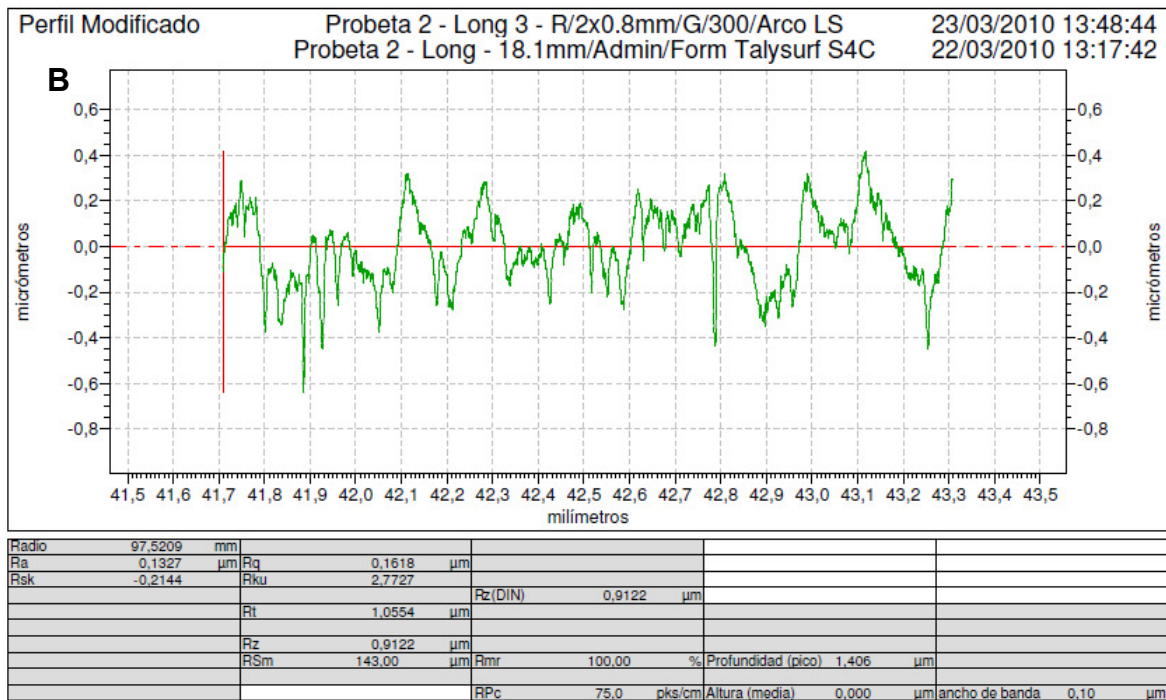
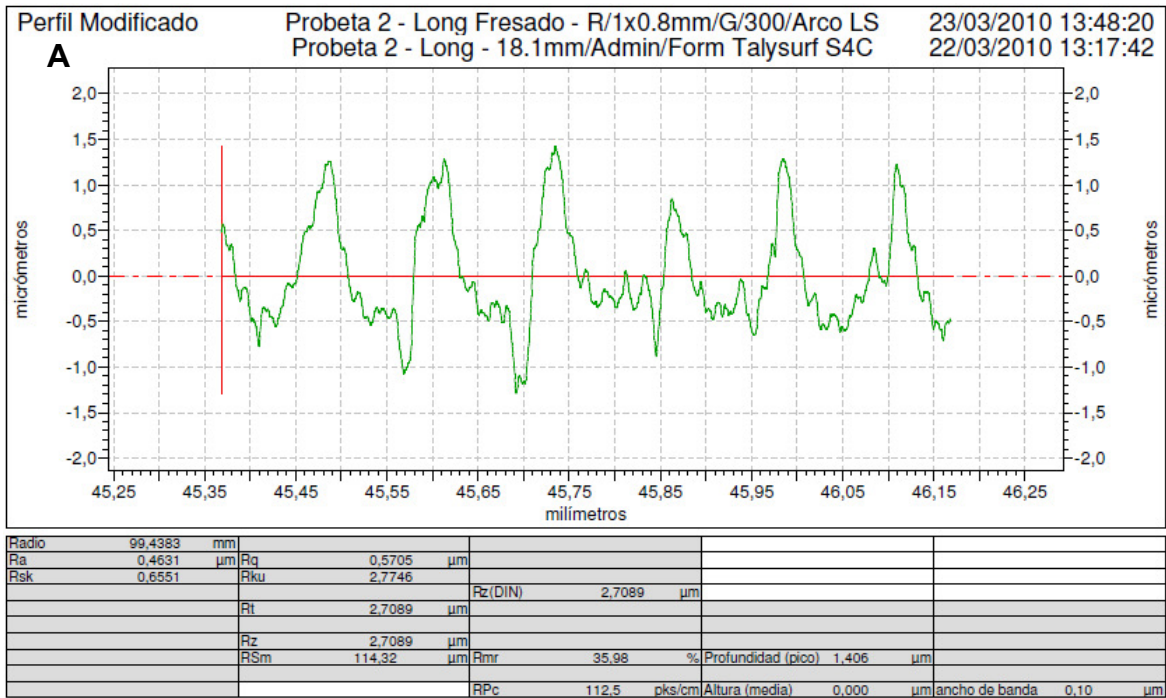


Gráfico A5- 23. Rugosidad superficial medida en el sentido paralelo al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruñido de la pieza

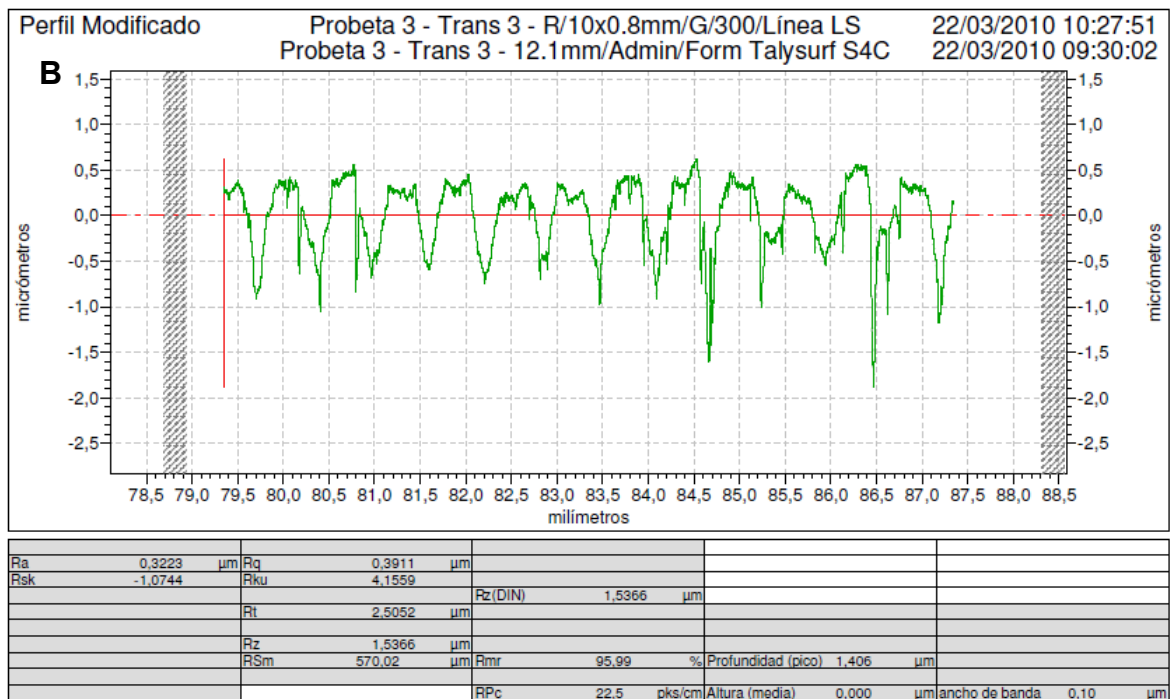
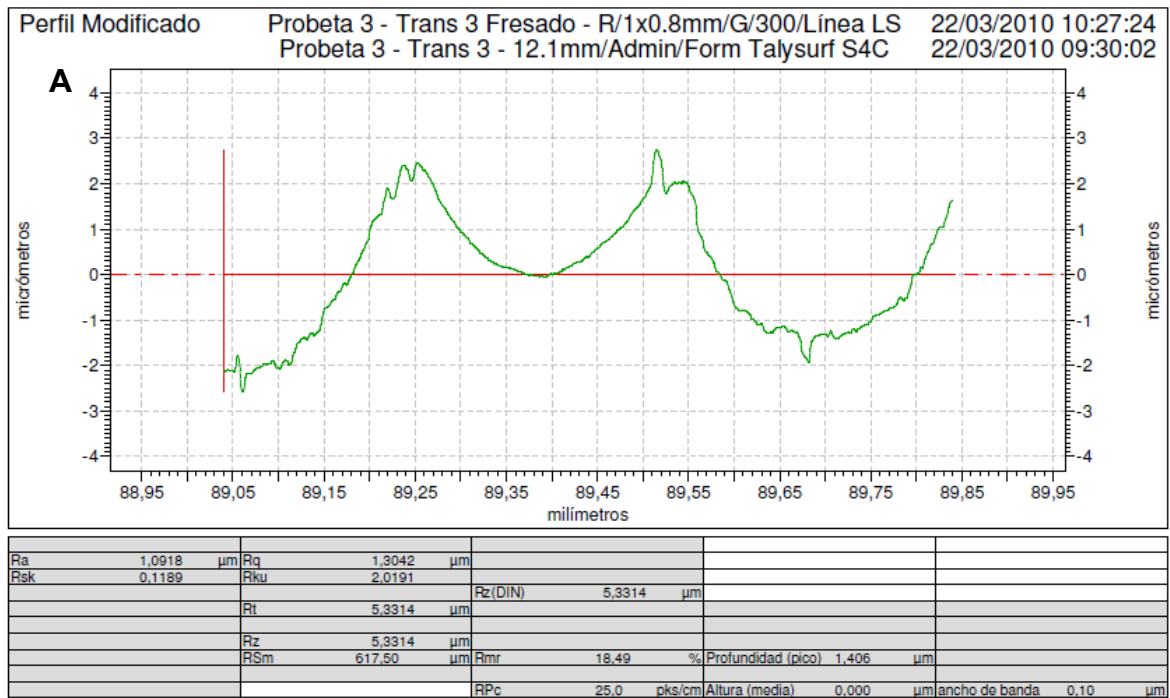


Gráfico A5- 24. Rugosidad superficial medida en el sentido perpendicular al fresado, obtenida para el perfil (A) fresado y (B) bruído de la pieza

Anexo 5.9. Gráficos de rugosidad superficial con las mediciones del salto entre las crestas de la superficie fresada y bruñida utilizados para la validación del modelo físico

Aluminio A92017

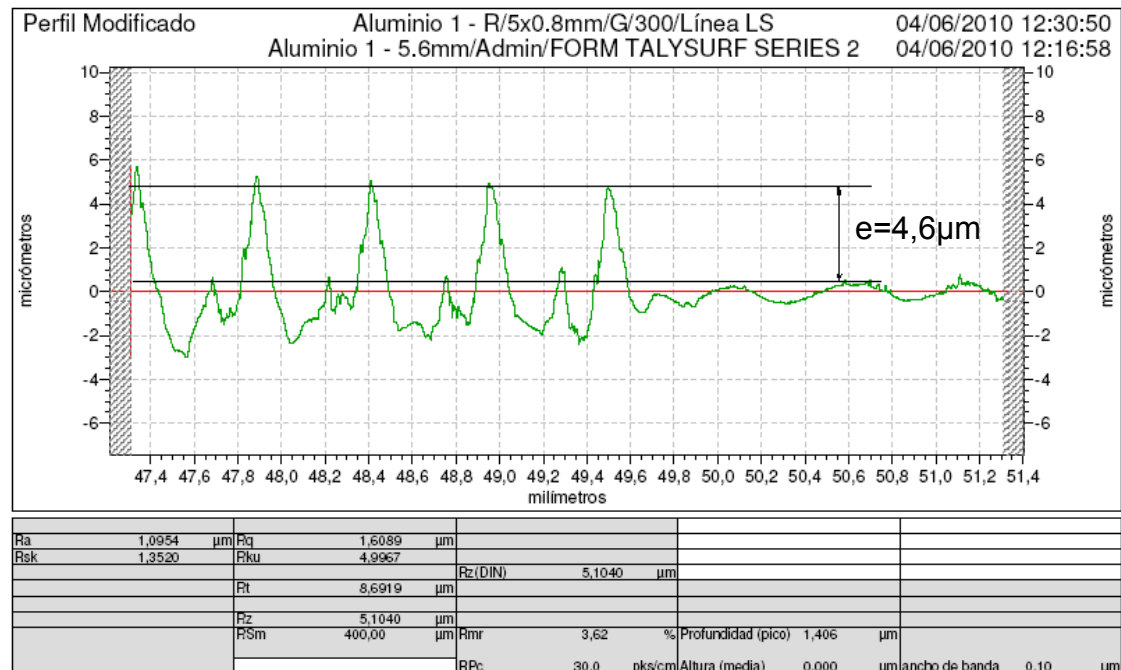


Gráfico A5- 25. Salto medido entre la superficie fresada y la bruñida para $F=11,62N$

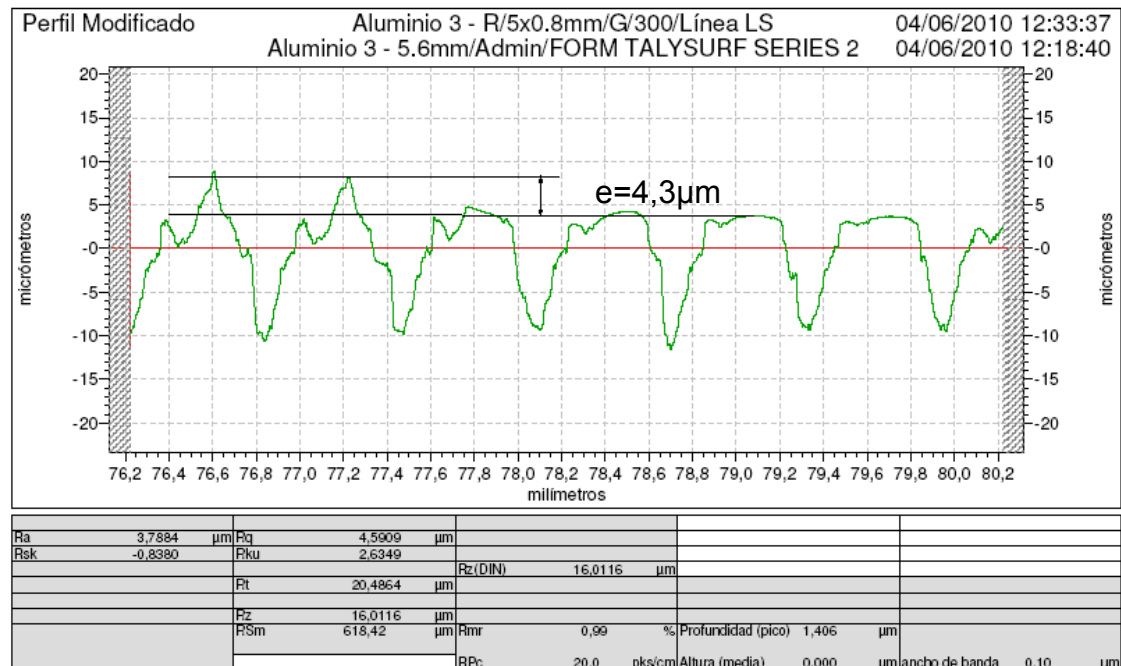


Gráfico A5- 26. Salto medido entre la superficie fresada y la bruñida para $F=11,49N$

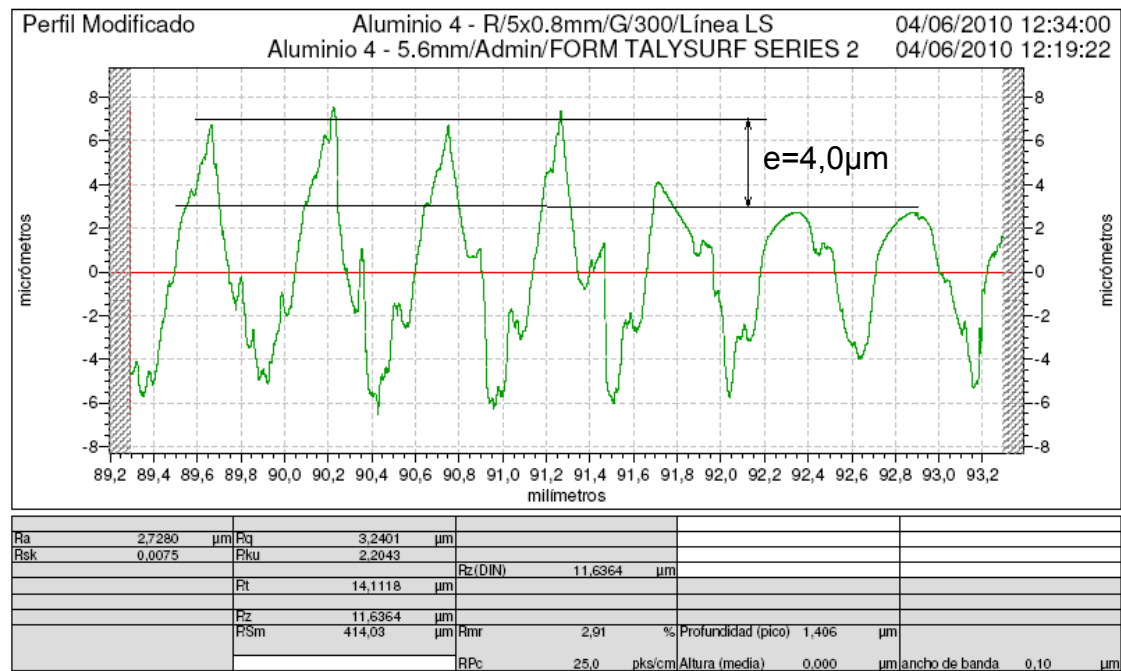


Gráfico A5- 27. Salto medido entre la superficie fresada y la bruñida para F=10,66N

Acero G10380

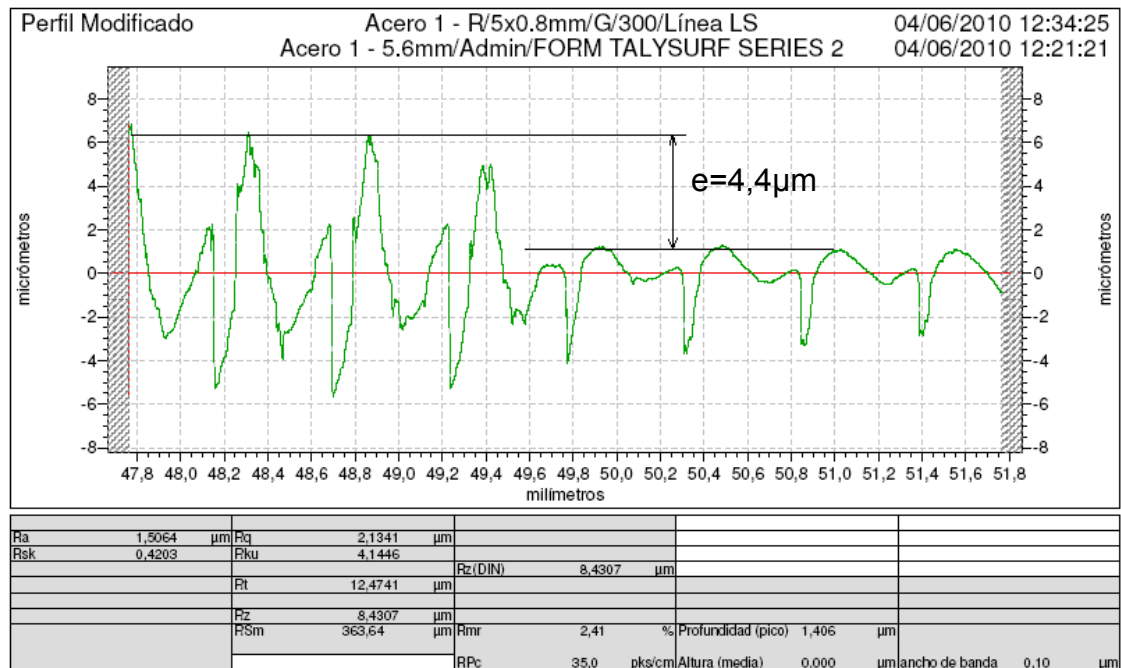


Gráfico A5- 28. Salto medido entre la superficie fresada y la bruñida para F=39,97N

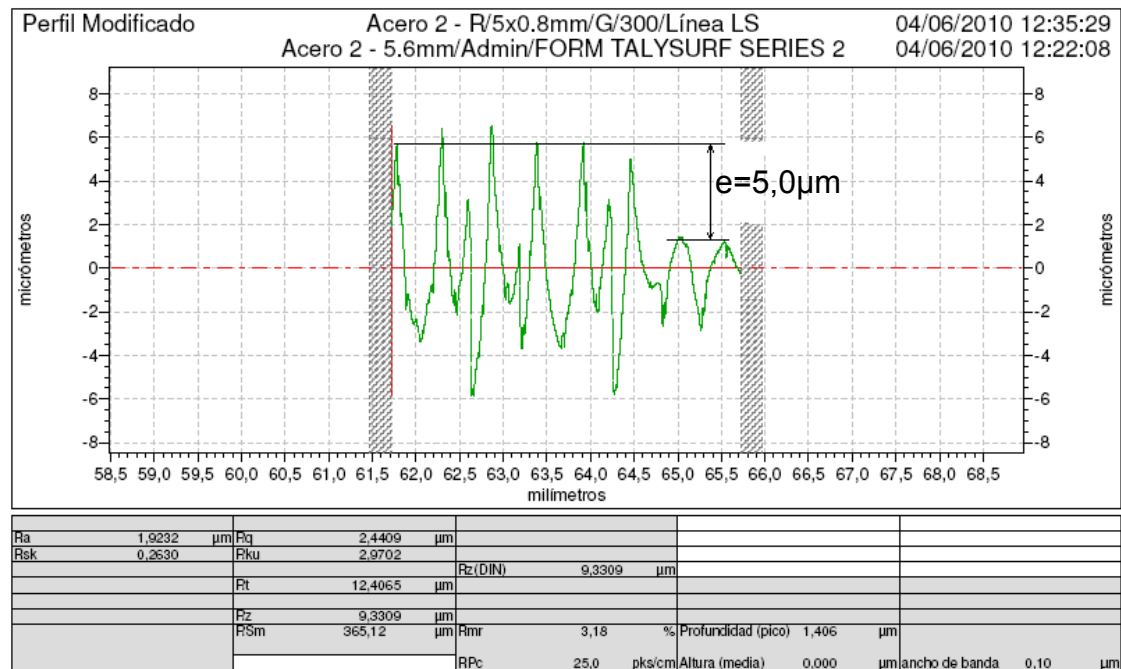


Gráfico A5- 29. Salto medido entre la superficie fresada y la bruñida para F=45,11N

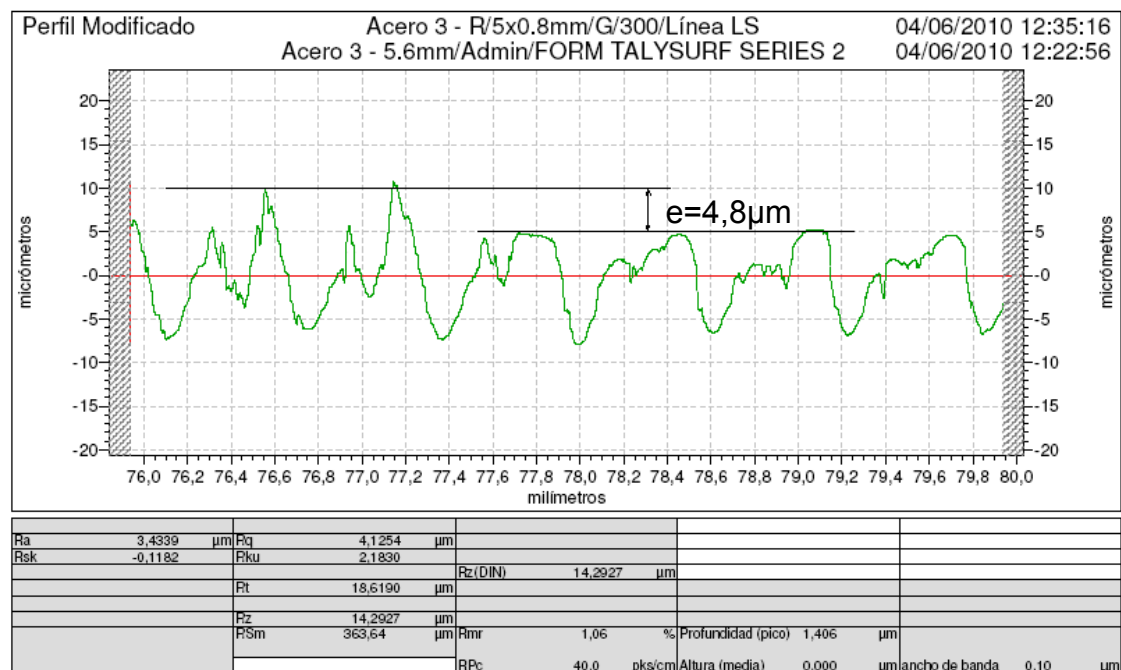


Gráfico A5- 30. Salto medido entre la superficie fresada y la bruñida para F=43,72N

Anexo 6. Gráficos obtenidos en la monitorización de las fuerzas de bruñido

La monitorización de las fuerzas de bruñido fue llevada a cabo durante el desarrollo de los experimentos realizados en el centro de mecanizado HURON, las fuerzas se midieron utilizando una mesa de fuerzas de la casa KISTLER, la cual está controlada por el *software DynoWare* de la misma casa. La manera de colocar la pieza y la mesa de fuerzas, se pueden observar en la figura A6-1.



Figura A6- 14. Instalación para la monitorización de las fuerzas de bruñido en la máquina HURON

A continuación se muestran los gráficos obtenidos durante la monitorización de las fuerzas durante el proceso de bruñido, que han sido utilizados para validar el modelo físico del capítulo 4.

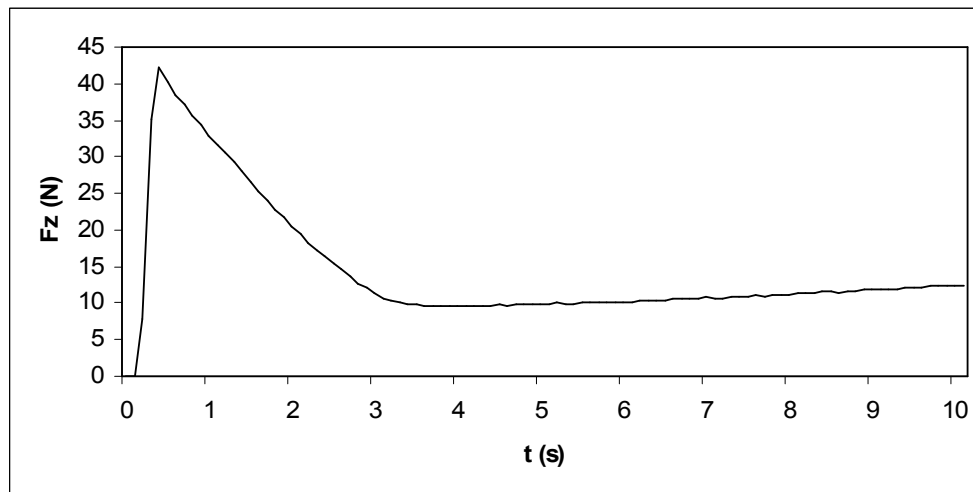


Figura A6- 15. Gráfico de fuerzas monitorizadas para el ensayo del bruído del Aluminio A92017 con una fuerza de $F_z=11,62$ N

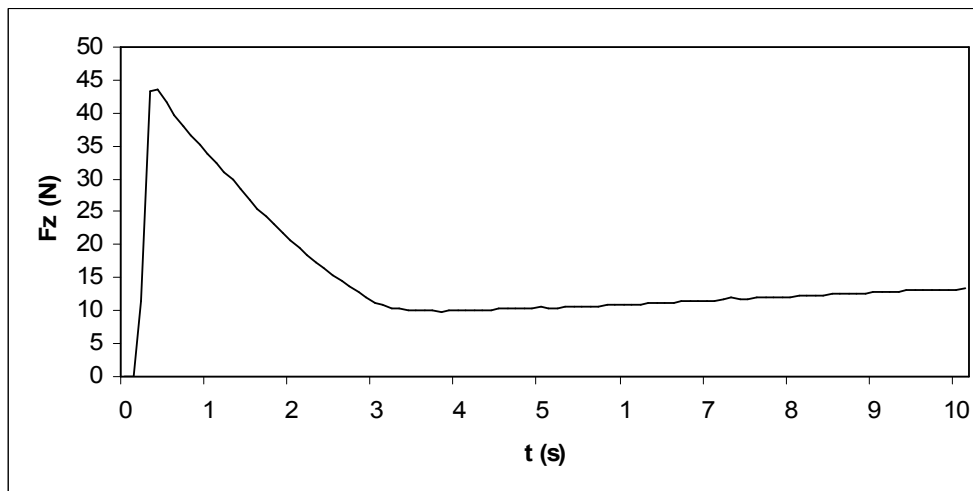


Figura A6- 16. Gráfico de fuerzas monitorizadas para el ensayo del bruído del Aluminio A92017 con una fuerza de $F_z=11,49$ N

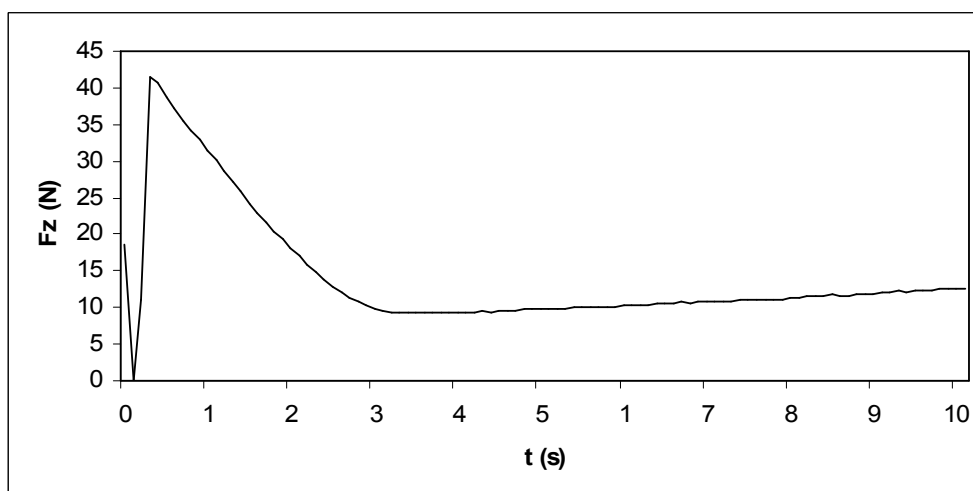


Figura A6- 17. Gráfico de fuerzas monitorizadas para el ensayo del bruído del Aluminio A92017 con una fuerza de $F_z=10,66$ N

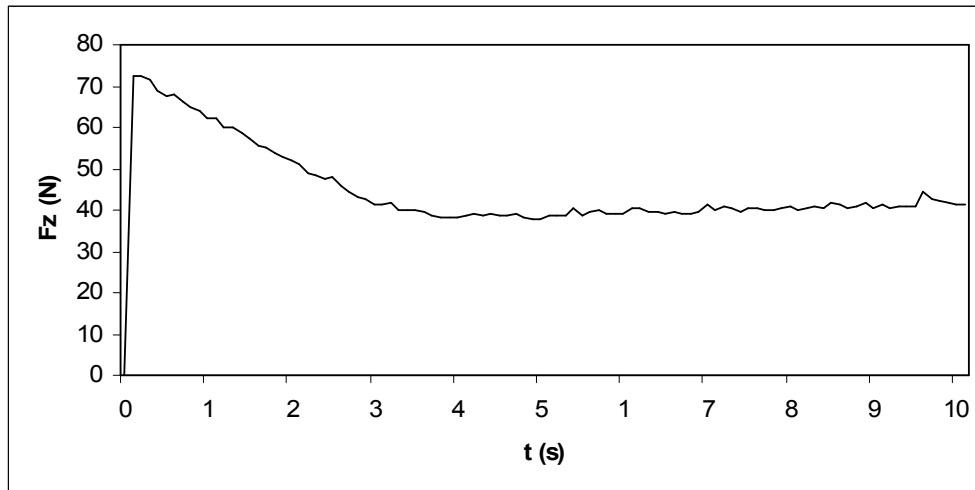


Figura A6- 18. Gráfico de fuerzas monitorizadas para el ensayo del ruido del Aluminio A92017 con una fuerza de $F_z=39,97$ N

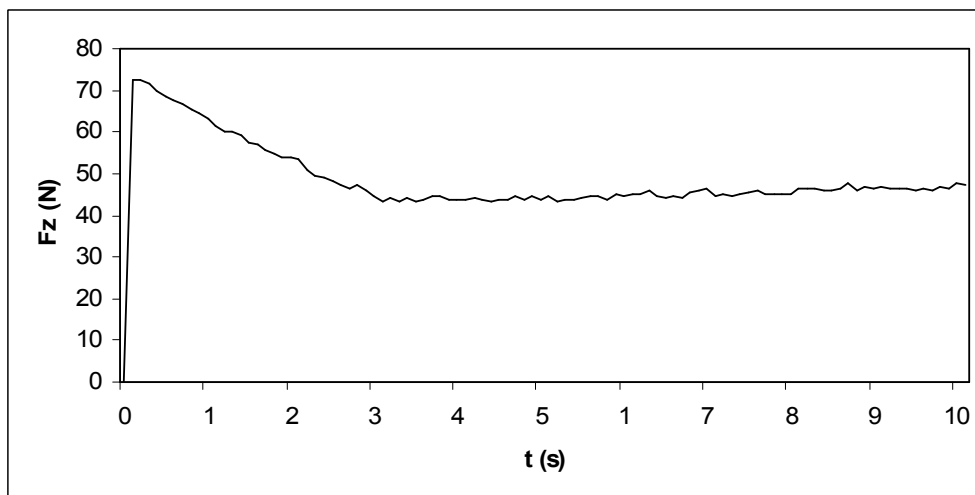


Figura A6- 19. Gráfico de fuerzas monitorizadas para el ensayo del ruido del Aluminio A92017 con una fuerza de $F_z=45,11$ N

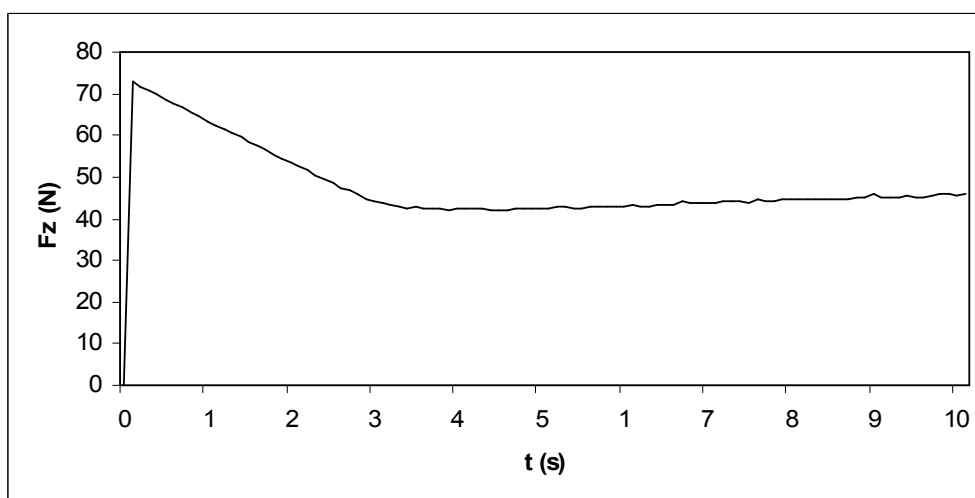


Figura A6- 20. Gráfico de fuerzas monitorizadas para el ensayo del ruido del Aluminio A92017 con una fuerza de $F_z=43,72$ N

Anexo 7- Análisis estadístico de los valores de dureza *HV*

HV	Malo	Aviso							N	tp (95%)
256.0			Carga (g)	300	3,000				1	12,7062
244.0									2	4,30265
253.0			Objectivo	40		Objectivo	O.N.		3	3,18245
289.0		NO				10	0,25		4	2,77645
269.0			pendiente	Valor	Error	50	0,65		5	2,57058
257.0			Interc. (μm)			100	0,95		6	2,44691
255.0									7	2,36462
254.5									8	2,306
256.0			λ (μm)	0,40					9	2,26216
255.5									10	2,22814
254.3			Resolución óptica (μm)	0,80					11	2,20099
256.3									12	2,17881
255.0			Medidas buenas	17			Dureza		13	2,16037
254.0						<x>+2S	276,008		14	2,14479
254.5			HV	Error		Max	289		15	2,13145
255.0			257,3	5,3		Min	244		16	2,11991
256.3						<x>-2S	238,627		17	2,10982
	296								18	2,10092
						Desviación	9,34513		19	2,09302
						Error Accid	4,80484		20	2,08596
						Error Resol	0,5		21	2,07961
									22	2,07387
						F(N) =	2,942		23	2,06866
						Constant	0,18909		24	2,0639
						Gravetat	9,80665		25	2,05954
									26	2,05553
									27	2,05183
									28	2,04841
									29	2,04523
									30	2,04227
									31	2,03951
									32	2,03693
									33	2,03452
									34	2,03224
									35	2,03011
									36	2,02809
									37	2,02619
									38	2,02439
									39	2,02269
									40	2,02108
									41	2,01954
									42	2,01808
									43	2,01669
									44	2,01537
									45	2,0141
									46	2,0129
									47	2,01174
									48	2,01063
									49	2,00958
									50	2,00856
									51	2,00758
									52	2,00665
									53	2,00575
									54	2,00488
									55	2,00404
									56	2,00324
									57	2,00247
									58	2,00172
									59	2,001